Российская академия наук

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Том 58 № 1 2022

Журнал основан в январе 1964 г.
Выходит 4 раза в год
ISSN 0424-7388

Журнал издается под руководством
Отделения общественных наук РАН

Главный редактор

В.Л. Макаров

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, С.А. Афонцев, А.Р. Бахтизин (зам. главн. ред.),
В.А. Волконский, Н.А. Волчкова, Ю.Н. Гаврилец, В.Г. Гребенников,
В.Е. Дементьев (зам. главн. ред.), Г.В. Егоров, Р.С. Ениколопов, А.В. Захаров,
С.Б. Измалков (зам. главн. ред.), В.Л. Квинт, Г.Б. Клейнер, М. Кубонива,
А.М. Либман, В.Н. Лившиц, В.М. Полтерович, А.Б. Поманский,
А.В. Савватеев, Е.В. Устюжанина (зам. главн. ред.), И.С. Шитова (зам. главн. ред.)

Заведующая редакцией Н.С. Виноградова

Журнал «Экономика и математические методы»
входит в Перечень ВАК, базы данных РИНЦ,
Web of Science (Emerging Sources Citation Index)

Адрес редакции:

117418, г. Москва, Нахимовский просп., 47, ком. 305
Тел.: 8(499) 129-39-33, 8(916) 139-27-26
e-mail: emm@cemi.rssi.ru

Москва

© Российская академия наук, 2022
© Составление. Редколлегия журнала
«Экономика и математические методы», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Том 58, номер 1, 2022

Теоретические и методологические проблемы

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. Agent-based modeling for a complex world. Part 1 5

Устюжанина Е.В. Сетевая экономика как социально-экономическая модель 27

Торопцев Е.Л., Мараховский А.С. Структурные инерционности экономических систем 38

Козырь Ю.В. Феномен ликвидности: суть, критерии, свойства и влияние на рыночную и инвестиционную стоимость активов 48

Народнохозяйственные проблемы

Зоидов К.Х., Зиядуллаев Н.С., Медков А.А. Эволюция евроазиатских отношений в духе Великого шелкового пути: обзор научных материалов 61

Алейникова Н.А., Матвеев М.Г. Цифровая технология организации централизованных закупок 70

Региональные проблемы

Шаталова О.М., Касаткина Е.В., Лившиц В.Н. Кластерный анализ и классификация промышленно ориентированных регионов РФ по экономической специализации 80

Дудин М.Н., Шкодинский С.В., Усманов Д.И. Элементы корреляционного анализа в оценке цифрового неравенства отдельных регионов России 92

Отраслевые проблемы

Комарова И.П. Понятие и типы сетевого капитала (на примере авиастроения) 104

Математический анализ экономических моделей

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В. Агентное моделирование социально-экономических последствий миграции при государственном регулировании занятости 113

Кармалита В.А. Адаптация стохастической модели экономических циклов к эмпирическим данным 131

* * *

В.Г. Гребенников 140

Э.Ф. Баранов 143

Russian Academy of Sciences

ECONOMICS AND MATHEMATICAL METHODS

VOLUME 58 No. 1 2022

Founded in January 1964
4 issues a year
ISSN 0424-7388

The Journal is run under the supervision of the Department of Social Sciences at RAS

Editor-in-Chief

V.L. Makarov

Editorial Board:

Afanasiev A.A., Afontsev S.A., Bakhtizin A.R. (Deputy Editor-in-Chief), Dementiev V.E. (Deputy Editor-in-Chief), Egorov G.V., Enikolopov R.S., Gavrilets Yu.N., Grebennikov V.G., Izmalkov S.B. (Deputy Editor-in-Chief), Kleiner G.B., Kuboniwa M., Kvint V.L., Libman A.M., Livshits V.N., Polterovich V.M., Pomanskiy A.B., Savvateev A.V., Shitova I.S. (Deputy Editor-in-Chief), Ustyuzhanina E.V. (Deputy Editor-in-Chief), Volchkova N.A., Volkonskiy V.A., Zakharov A.V.

Secretary of Editorial Staff N.S. Vinogradova

The journal "Economics and Mathematical Methods" is included in the list of the Higher Attestation Commission (HAC) and indexed in Russian Index of Scientific Citation, Web of Science (Emerging Sources Citation Index)

Editorial Address

Nakhimovskiy Prospect, 47, Office 305, Moscow, Russia, 117418
Tel.: +7(499) 129-39-33; +7(916) 139-27-26;
e-mail: emm@cemi.rssi.ru

Moscow

© Russian Academy of Sciences, 2022
© Composition. Editorial Board of Economics and Mathematical Methods, 2022

CONTENTS

Volume 58, No. 1, 2022

Theoretical and methodological problems

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. Agent-based modeling for a complex world. Part 1 5

Ustyuzhanina E.V. Network economy as a socio-economic model 27

Toroptsev E.L., Marakhovskiy A.S. Structural inertia of economic systems 38

Kozyr Yu.V. Liquidity phenomenon: Essence, criteria, properties and impact on the market and investment value of assets 48

Problems of national economy

Zoidov K.Kh., Ziyadullaev N.S., Medkov A.A. The evolution of Eurasian relations in the spirit of Great Silk Road: Review of the scientific materials 61

Aleynikova N.A., Matveev M.G. Digital technology for centralized procurement organization 70

Regional problems

Shatalova O.M., Kasatkina E.V., Livchits V.N. Cluster analysis and classification of Russia's industrial oriented regions by economic specialization 80

Dudin M.N., Shkodinsky S.V., Usmanov D.I. Elements of correlation analysis in the assessment of digital inequality of some regions of Russia 92

Industrial problems

Komarova I.P. The concept and types of network capital (example of aircraft industry) 104

Mathematical analysis of economic models

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V. Agent-based modelling of social and economic impacts of migration under the government regulated employment 113

Karmalita V.A. Adaptation of stochastic model of economic cycles to empiric data 131

* * *

V.G. Grebennikov 140

E.F. Baranov 143

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 5–26

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Agent-based modeling for a complex world. Part 1

© 2022 V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, J.M. Epstein

V.L. Makarov,
Academician of the Russian Academy of Sciences, Russia's largest (prominent) specialist in the field of computer modeling of socio-economic processes; Scientific Director of the Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences; President of the Russian School of Economics (New Economic School); Director of the Higher School of Public Administration of the Moscow State University, Moscow, Russia; e-mail:

A.R. Bakhtizin,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Director of the Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences; Professor at the Moscow State University; Certified CGE Modeler (World Bank Institute Certified); Holder of professional certificates from Microsoft Company (Microsoft Certified Professional, Microsoft Certified Application Developer, Microsoft Certified Solution Developer), Moscow, Russia; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

J.M. Epstein,
Professor of Epidemiology at the NYU School of Global Public Health, and founding Director of the NYU Agent-Based Modeling Laboratory, with affiliated faculty appointments to the Courant Institute of Mathematical Sciences, and the Department of Politics; e-mail: je65@nyu.edu

Received 10.12.2021

The authors thank Elena Boinovich and Milana Sidorenko for their assistance in the technical edition.

The reported study was funded by Russian Science Foundation according to the research project no. 21-18-00136 "Development of a software and analytical complex for assessing the consequences of intercountry trade wars with an application for functioning in the system of distributed situational centres in Russia."

Abstract. The main goal of this paper is to summarize selected developments in the field of artificial societies and agent-based modeling and to suggest, how this fundamentally new toolkit can contribute to solving some of the most complex scientific and practical problems of our time. The entire field of agent-based modeling has expanded dramatically over the last quarter century, with applications across a remarkable array of fields, at scales ranging from molecular to global. The models described in this paper are a small part of worldwide scientific and practical developments in the field of agent-based modelling and related areas. We have attempted to give an impression of the vast range of application areas (epidemiology, economics, demography, environment, urban dynamics, history, conflict, disaster preparedness), scales (from cellular to local to urban to planetary), and goals (simple exploratory models, optimization, generative explanation, forecasting, policy) of agent-based modeling. Agent-based models offer a new and powerful alternative, or complement, to traditional mathematical methods for addressing complex challenges.

Keywords: agent-based models, epidemiology, pedestrian traffic, demographic processes, transport systems, ecological forecasting, land use, urban dynamics, historical episodes, conflict simulation, social networks, economic systems.

JEL Classification: C63, D91.

Quoting: **Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M.** (2022). Agent-based modeling for a complex world. Part 1. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 5–26. DOI: 10.31857/S042473880018970-6

INTRODUCTION: COMPLEXITY DEMANDS NEW MODELING TOOLS

Recent global shocks have demonstrated the coupling of large-scale systems. The COVID-19 pandemic was not only a public health catastrophe, but an economic one as well, with combined effects distributed very unevenly within and between countries. However, in its cascading effects, the pandemic was not unique. Disruptive technologies and seemingly local political or economic shocks can have system-wide ramifications, to say nothing of climate change and other environmental perturbations. By any definition, we are living in a complex system requiring new tools and new ways of thinking. One of these is Agent-Based Modeling, which we review here.

What are agent-based models?

What are agent-based models and how can they help us navigate a complex world? The classic agent-based model is an artificial society of software individuals. They interact directly with one another in some artificial environment, which could be a geographical landscape, an organization, or a social network. These interactions can alter the agents and their environment, which in turn affects the agents, and so forth, often producing complex non-equilibrium dynamics. These micro-scale agent interactions can also generate stable macroscopic social patterns, such as spatial segregation patterns, statistical distributions of wealth, or dynamic epidemic trajectories. While, in the beginning, "Toy" agent-based models were used to illuminate counter-intuitive mechanisms of herd immunity, economic scaling laws, and racial residential clustering, they have grown into mature scientific instruments, where model-generated patterns (model outputs) are compared to real world macro- (aggregated) data. When they agree, the micro-scale agent-based model reveals a generative mechanism, and constitutes a candidate generative explanation, of the macro-scale phenomenon. J.M. Epstein uses the term "*Generative Social Science*" for the approach (Epstein, Axtell, 1996; Epstein, 2006). There may be other generative explanatory candidates, in which case further data or experiments may be required to decide between them, as in any science where theories compete. But, generative sufficiency is a necessary condition for explanation. As Epstein, puts it, "If you didn't grow it, you didn't explain it" (Epstein, 2006, p. 51).

Some social-level phenomena are difficult (even impossible) to "grow" in homogeneous populations of perfectly-informed utility maximizers, of the sort one encounters in neoclassical microeconomics and game theory. Rather, agents are typically heterogeneous, have imperfect information, and are *boundedly* rational, to use Herbert Simon's famous term. Recent agents, such as *Agent_Zero* (Epstein, 2013), even include a fear module grounded in cognitive neuroscience, which can override the agent's conscious deliberations, about risk for example.

Finally, due to the explosive growth of computing power, and the advent of specialized programming languages for agent-based modeling, very large-scale agent-based models have been constructed in epidemiology, economics, and related fields.

What *distinctive* contributions can the agent-based approach make in understanding and shaping what, by any definition, is an increasingly complex world? One contribution is to close the micro-macro gap.

The micro-to-macro gap

For example, methods of multivariate regression analysis have been used to determine the relationships between macroscopic socio-economic indicators. The resulting regression equations can be very useful in predicting how a change in some aggregate variable (e.g., income taxes) will affect another aggregate variable (e.g., total consumption). But, by definition, the regression equations are aggregate (macro-to-macro) functions. As such, they can give no account of *how the macroscopic patterns emerge* from the bottom up, through interactions at the micro scale. As we will review, the evolution of large-scale agent-based modeling promises to fill this gap, allowing generative explanations of macro phenomena, in turn allowing us to explore how policies applied at the *micro* level may "bubble up" to alter social level patterns in desirable ways. Moreover, the micro interactions typically involve *heterogeneous* agents interacting in *networks*, both of which are difficult to capture in well-mixed compartmental differential equations. Finally, the micro world (and the macro patterns) may be highly dynamic and far from equilibrium, eluding static equilibrium approaches. One important development propelling large-scale agent modeling has been computing power.

Explosive growth in computational power

From the 1990s to the present day, the power of computing systems has grown almost exponentially. In comparison with 1993, the total performance of the 500 fastest supercomputers has grown almost 2 million times and is more than 2.5 exaFLOPS[1], and the performance of the top-end FUGAKU[2] and LUMI[3] systems is approximately 0.5 exaFLOPS. Presumably, the exaFLOP barrier for one supercomputer will be overcome within a year or two.

The shear computational barriers to large-scale heterogeneous agent modeling have largely been overcome. The main challenge now is to populate large models with cognitively plausible software individuals for

[1] Data of the portal containing the rating and descriptions of the 500 most powerful computing systems in the world: https://www.top500.org

[2] FUGAKU supercomputer website: https://www.fujitsu.com/global/about/innovation/fugaku

[3] LUMI supercomputer website: https://www.lumi-supercomputer.eu

purposes ranging from fundamental understanding of social dynamics to the design of policies. Prediction is often assumed to be the goal. But often it isn't. For example, the literal prediction of not-yet-evolved viruses is not in sight. However, agent-based modeling can help prepare for events we cannot, and may never be able to predict. Novel pathogens and pandemics are prime examples, but the economic, political, and environmental spheres provide others requiring new tools and new ways of thinking. Recent global shocks illustrate, moreover, that in a connected word, they are coupled, as in the COVID-19 pandemic and economic crises of 2020–2021.

Adjacent worlds

We note that many research centers worldwide are certainly involved in large-scale computational modeling. Among these, one might point to: GTAP, MIRAGRODEP, MIRAGE, GLOBE, MULTIMOD, GEM, Global Macrofinancial Model, The Long Term Growth Model, Moody's Research LabsInc. Model, WorldScan, LINK, WEFM, KPMG-MACRO, NiGEM. A more detailed overview was given in the journal article "*Herald of Russian Academy of Sciences*" (Makarov, Wu et al., 2019; Makarov, Wu et al., 2020). Generally speaking, however, these models are based mainly on the "top-down" equilibrium approach, and do not purport to identify "bottom-up" (micro-to-macro) mechanisms, which have loomed large in the epidemic and economic "black swans" of 2020. So, they belong to a different research *programme*.

Agent-based modeling, multi-agent systems, and distributed artificial intelligence

Likewise, we distinguish between the research *programme* for Agent-Based Modeling and the Multi-Agent Simulation agenda. While these communities overlap, at its core, Multi-Agent Simulation is in the distributed artificial intelligence (DAI) tradition and is oriented primarily toward applied mechanism design and system optimization. For example, in the field of electronic commerce (Ehikioya, Zhang, 2018) DAI is used to develop optimal trading strategies (Sugumaran, 2009), to plan optimal transport networks (Boulmakoul, Karim, Lbath, 2021), or plan the effective use of network resources (Janbi et al., 2020; Yadav, Mahato, Linh, 2020). By contrast, agent-based modeling is focused on generative explanations of social dynamics as in the Schelling segregation model, the Epstein–Axtell Sugarscape model, and the Alife (Artificial Life) tradition. While these communities have largely separate journals, conferences, methods, applications, and audiences, there are intersections of note (Corea, 2019).

Swarm intelligence is an example (Ilie, Bădică, 2013). It is a decentralized self-organizing system used to solve optimization problems. For example, ant colony optimization algorithms, which simulate the actions of ants, can be used to solve graph-based route finding problems (the traveling salesman problem) (Ilie, Bădică, 2010). Our focus here will be on the developments of agent-based modeling, though symbiosis with related approaches is a high priority[4].

While the field of artificial societies is our present focus, we do not claim that agent-based modelling is the best tool for all purposes. There are many other analytical tools that may be more effective for particular tasks and that also have software implementations including neural networks and other machine learning methods, not to mention differential equations. These approaches can often complement one another.

The dialogue between methods

For example, in epidemiology, we often start by building a deterministic well-mixed (non-spatial) ordinary differential equations model with homogeneous pools (e.g., susceptibles and infectives) and studying its dynamics and equilibria analytically. These have given fundamental insights into core phenomena like herd immunity and the vaccine levels required to induce it. Then we "agentize" the classic model, relaxing these stringent mean field assumptions, introducing randomness (stochasticity), space (which could be a physical landscape, a network, or both), heterogeneous agents and behavioral adaptation, to study the robustness of the classical results. The ordinary differential equations and agent-based modeling results can differ radically, suggesting novel approaches to epidemic containment (Epstein et al., 2008). To date, many specialized software tools for building agent models (NetLogo, RePast, MASON, AnyLogic and others) have been developed.

Aims and organization

With this motivation, our aims are (a) to invite the reader to consider the potential of agent-based models for studying the world around us, (b) to review selected results in several important fields, and (c) to suggest fertile lines of future research. The authors of the paper published scientific works in which they gave characteristics and described successful examples of the implementation of agent-based models (see, for example, (Bakhtizin, 2008; Makarov, Bakhtizin, 2013; Epstein, Axtell, 1996; Epstein, 2006, 2013; Parker,

[4] The authors thank Robert Axtell for a very useful discussion of this distinction

Epstein, 2011)). Here we focus only on individual points showing the benefits of the approach. In addition, this is such a rapidly developing area that any review is supposed to be selective and incomplete[5].

This paper consists of 12 sections in two parts. The first one considers the history of agent-based models. The second section is devoted to models of this class related to epidemiology, and the third considers agent-based modeling of pedestrian traffic and population evacuation. The fourth section is devoted to issues of demographic process modeling, and the fifth to the simulation of transport systems. Part two — Ecological forecasting is considered in section six, while the seventh is devoted to issues of land use, and the eighth — to urban dynamics. The ninth section considers models used for the reconstruction of historical episodes, and in the tenth section, we briefly touch on the issues of conflict simulation. In section eleven of the paper, we consider issues related to studying social networks using an agent-based approach. Agent-based models of economic systems are considered in the twelfth section. Undoubtedly, the scope of applications of agent-based models is wider, but we focused on these indisputably significant areas.

1. HISTORICAL EXCURSION

It is difficult to identify the exact dawn of the agent-based approach. Some researchers link the emergence of agent models with cellular automata (CAs) of the 1940s. The great mathematician, John von Neumann laid foundations for modern computing (the von Neumann architecture), participated in the Manhattan Project, and dealt with issues of self-replicating systems. He proposed the concept of CAs, further developed by his colleague, Stanislav Ulam. Over the next decades, a large number of CAs with a wide variety of rules for the transition between states has been developed, and myriad articles and books have been written on this topic[6]. One of the most famous of these CAs is the game "Life," developed by the English mathematician John Horton Conway in 1970. It not only became a classic, but also gave rise to a huge number of variations (Gardner, 1970).

The American economist and 2005 Nobel Laureate in game theory — Thomas Schelling, in a 1971 article "*Dynamic models of segregation*" proposed a *cellular automaton* describing the process of segregation and showed, surprisingly, that strong spatial segregation can emerge even when the individual agents have an extremely weak preference for neighbours of their own colour (Schelling, 1971). The Shelling model was substantially extended and applied to replicate true historical segregation patterns in multiple countries (Hatna, Benenson, 2015).

As proved by Matthew Cook (Cook, 2004), CAs are capable of universal computation, as are Turing Machines, the Lambda calculus, partial recursive functions and other inter-translatable formalisms. So CAs, while hardly unique in this respect, are in good computational company and have the distinct advantage of being simple to program and easy to visualize. For many examples, see "*A New Kind of Science*" (Wolfram, 2002).

One outgrowth of CAs is the field of Artificial Life, pioneered by Christopher Langton at the Santa Fe Institute in the US (Langton, 1989). The field of CAs is a fast-moving area, and with the wide availability of high-performance computing, this direction may be expected to advance dramatically.

Classic CAs do not have heterogeneous agents, or ones who interact with (and alter) an external landscape, or engage in sexual reproduction, form networks and tribes, or engage in resource conflict, trade, and the transmission of cultures, immune systems, and diseases in a single unified artificial society. This is the realm of Agent-Based Modeling.

The first such integrated Artificial Society model, named Sugarscape, was developed (without knowledge of Schelling's model) in the early 1990s. An author of the present article, Epstein, created what was widely called "a foundational trilogy on agent-based modelling". The first volume "*Growing artificial societies: Social science from the bottom up*" (Epstein, Axtell, 1996) examined the now classic Sugarscape, which despite its relative simplicity, made a significant contribution to the development of the *generative epistemology* discussed earlier.

The second volume, "*Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*" (Epstein, 2006), was not about artificial society, but it was a collection of focused studies demonstrating the agent-based approach as applied to a host of scientific fields including evolutionary games, economics, epidemiology, archaeology, organizations, and conflict. These include several realistic empirical studies and practical applications.

---

[5] The largest bibliographic databases Web of Science and SCOPUS show publications to have grown by 120 fold over the period 2000–2020.

[6] Data from the bibliographic and abstract base of scientific publications: https://www.scopus.com

Dostoevsky

One of the challenges posed by Epstein at the end of "*Generative Social Science*" (Epstein, 2006) was to "grow Raskolnikov", an internally conflicted agent, whose behavior results from an internal competition between reason and passion. Hume famously wrote that "Reason is...the slave of the passions" and so it was for Dostoevsky's immortal character, in which rational forces compete (unsuccessfully) with brooding murderous emotional ones. Is there a way to build software agents that include some simple representation of *emotions,* of *bounded rationality*, and of *social connection* (or isolation as the case may be)? These would appear to be minimal constituents of a cognitively plausible agent.

The third volume, "*Agent_Zero: Toward Neurocognitive Foundations for Generative Social Science*" (Epstein, 2013), was Epstein's answer. Unlike the perfectly informed utility maximizer of economic theory, *Agent_Zero's* behavior results from the interaction of an affective module (based on the neuroscience of fear), and a boundedly rational deliberative module exhibiting some systematic errors established by experimental psychologists from Herbert Simon to Daniel Kahnemann and others. *Agent_Zero* is also a social animal, influenced by other (emotionally driven and statistically hobbled) agents in her network (networks are in fact endogenous). When ensembles of *Agent_Zeros* interact, they replicate several important social psychology experiments, and generate collective phenomena from contagious violence to seasonal economic cycles to flight from contaminated areas and war zones. Because these are idealized exercises, Epstein (Epstein, 1999, 2013) called them "computational parables," but they have since led to current empirical research on the ways in which contagious fear can drive pandemic waves, addictive behaviors, and financial panics.

Since the mid-1990s, agent-based modeling has penetrated a wide variety of scientific and practical fields and was successfully used to solve many problems. Let us now consider several of them in more detail.

Powers of ten

We will see that some scientific and practical fields are already bored under the skin, modeling at the molecular level, while others scaled the agent populations into the billions, modeling at global scale.

2. EPIDEMIOLOGY

To begin, let us focus on a pressing problem: the spread of infectious diseases (i.e., epidemics and pandemics). The classic differential equations model was published by M.O. Kermack and A.G. McKendrick in "*A contribution to the mathematical theory of epidemics*" (Kermack, McKendrick, 1927). It is a so-called compartmental model with three homogeneous pools — the susceptibles (S), the infectives (I), and the recovered (R). This SIR model posits perfect mixing (mass action kinetics) between the S and I pools and yields fundamental insights about the nonlinear threshold nature of epidemics, and the conditions for herd immunity among other phenomena. For a full review, see "*The Kermack–McKendrick epidemic model revisited*" (Brauer, 2005). Applied to well-mixed homogeneous settings, the model performs well.

However, the modern world is highly heterogeneous (e.g., by immune status) and, as COVID-19 has demonstrated, transmission exploits contact networks on many scales, from local to global. Moreover, the classical models ignore endogenous behavioral adaptations. Some of these, like social distancing and mask-wearing, can supress transmission, while others, like vaccine refusal, can amplify it. These behaviors, furthermore, may be driven not by conscious "rational" deliberations but by unconscious "irrational" contagious fears. For models coupling fear transmission and disease transmission, see "*Coupled Contagion Dynamics of Fear and Disease: Mathematical and Computational Explorations*" (Epstein et al., 2008) and "*Triple Contagion: a Two-Fears Epidemic Model*" (Epstein, Hatna, Crodelle, 2021). Fear of illness can be contagious in the absence of disease. In 1994, hundreds of thousands of people fled the Indian city of Surat, fearing a pneumonic plague epidemic, although at the time of the mass exodus the World Health Organization had not confirmed a single case (Epstein, Hatna, Crodelle, 2021).

Agent-based models can represent, albeit crudely, the behavioral adaptations of heterogeneous individuals, which together represent an artificial society. The computational agent model is able to track each agent's network and spatial contacts, disease state, movements, distancing and vaccine behavior, and so forth. To test and calibrate the parameters of the model, it can be run many times to match statistics regarding the spread of such a known disease as smallpox (Longini et al., 2007). Within the framework of the constructed agent-based model, the transmission of infection from one person to another is tracked (in a so-called dendrogram) but equally important, agent behaviors resemble those of real people under stress, with inherent errors, biases, and other departures from textbook rationality. These behaviors have shaped global pandemic dynamics, including the multiple waves of the 1918 Spanish Flu and those of the ongoing pandemic of SARS-Cov-2 and its variants.

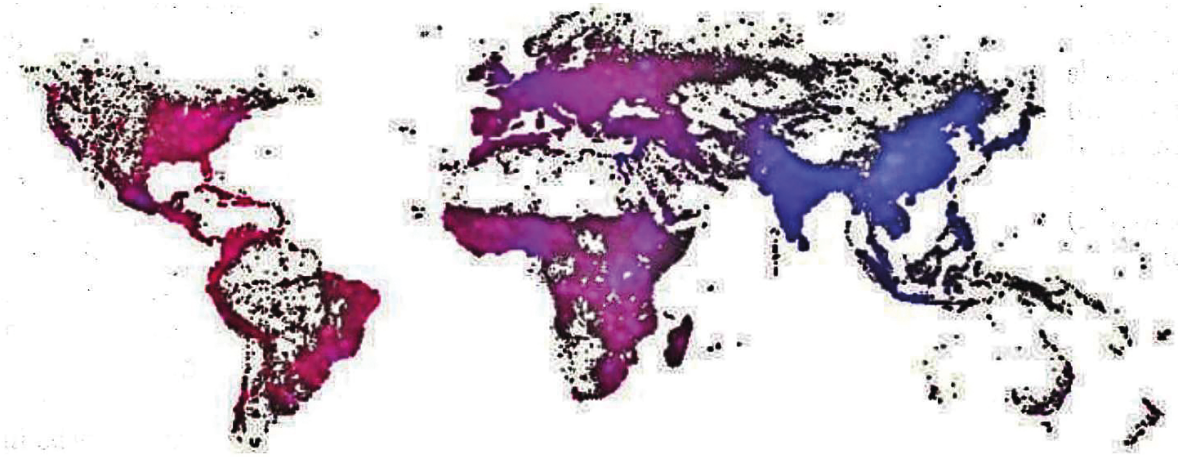


Fig. 1. The result of a computer simulation of the GSAM model simulating the H1N1 virus pandemic in Tokyo 130 simulated days into the epidemic. Each diseased agent is marked with a dot (black is healthy, red is sick, blue is recovered). Image from "Modeling to contain pandemics" (Epstein, 2009).

Planetary-scale agent models

Under Epstein's direction, the Brookings Institution's Center on Social and Economic Dynamics developed a Global-Scale Agent Model (GSAM). It simulates the interaction of 6.5 billion individuals moving on a world map, including intra- and inter-country contact dynamics (Parker, Epstein, 2011; Epstein, 2009). It was the first infectious disease model on this scale and to our knowledge remains the largest. Its development was funded by the US National Institutes of Health in response to the Bird Flu H5N1 crisis.

Data on contact patterns are better for some countries than others, but the advent of geo-coded location data from blue-tooth enabled devices (notably cell phones) promises a watershed in contact modeling, and is already central to contact tracing for COVID-19 pandemic containment.

Fig. 1 displays a global spread scenario for an H1N1 Swine Flu variant beginning in Tokyo (Epstein, 2009). Black pixels are healthy individuals, red are infected, and blue are recovered or dead. This screen shot is the state of affairs 130 simulated days into the epidemic, illustrating starkly our overarching point that the world is indeed highly connected. The model is stochastic so there are run-to-run variations even for the same initial conditions and parameter values. So, any particular simulation, such simulation is shown in Fig. 1, is but one sample path of a stochastic process. Typically, one will run the agent-based model many times to build up a robust statistical portrait of its performance.

At Epstein's Center for Advanced Modeling at Johns Hopkins Medicine, the GSAM was also used to study Ebola in 2014–2015, and configured to represent hemispheric seasonal oscillations and other planetary-scale dynamics.

The US National submodel of the GSAM includes 300 million agents, matched to US Census data. It includes workplaces, schools, and hospitals. Travel between the US's 30,000 zip codes is estimated econometrically. The US model was used to study the value of school closures, travel restrictions, and other interventions. Since viruses are constantly mutating, the arsenal of tools for combating them must constantly expand, including through agent-based models. A variety of these models, including the above, are posted at the New York University's Agent-Based Modeling Laboratory directed by Epstein[7].

Developing general purpose infectious disease models on these scales faces many software engineering problems (e.g., load balancing, parallelization, network modeling). For the GSAM, see "*A Distributed Platform for Global-Scale Agent-Based Models of Disease Transmission*" (Parker, Epstein, 2011). For more recent developments, see "*Charting the Next Pandemic: Modeling Infectious Disease Spreading in the Data Science Age*" (Piontti et al., 2018). Not only does behavior affect global spread, but it also shapes dynamics at the level of urban health care systems, as we now discuss.

[7] https://publichealth.nyu.edu/research-scholarship/centers-labs-initiatives/agent-based-modeling-lab

Related international efforts

At Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), a model was developed for predicting epidemiological dynamics depending on quarantine measures to estimate peak loads on the healthcare system. To this end, an agent-based model was constructed, in which human agents go through the stages of disease from infection to recovery or death. These transitions are modeled not at the level of the homogenous group (as in the classical models), but at the individual level. This makes it possible to take into account the heterogeneity of the population in terms of characteristics associated with the biological sensitivity of the people to infection and with their social participation (or withdrawal from circulation due to fear) in the proliferation of the disease. Thus, the probability of severe disease complications (stressing the health care system) depends on the individuals' basic level of health, and on the advance of infection taking into account social (e.g., kinship) connections.

The model was tested on the example of the COVID-19 epidemic in Moscow. The epidemiological characteristics of COVID-19, given by expert practitioners involved in the examination and treatment of patients, were used to plausibly mimic the course of disease within agents. Using computer simulations, estimates of the social course of the epidemic were obtained for various values of the model parameters, including the effect of quarantine measures on the number of infected and dead over the entire period of the epidemic; the date of the onset of the peak of infection and its extent; peak demand for hospital beds, including intensive care. The socio-demographic structure of the population and the epidemiological characteristics of a specific infection are the parameters of the model, which can be adjusted for other regions and infections for practical use as a decision support tool in regional and sectoral situation centers (Makarov, Bakhtizin, Sushko et al., 2020).

Since the onset of the coronavirus pandemic, there has been a sharp increase in the number of publications that use an agent-based approach to estimate the rate of spread of the disease, depending on scenario conditions.

Under the skin agent-based modeling

We have "zoomed in" from the global scale to the urban scale. We can go further. Agent-based modeling was bored under the skin to model intra-agent biological processes. These new directions include modeling drugs and their effect on the body at the molecular level and studying processes of inflammation and even tumor growth in cancers (Pourhasanzade et al., 2017) and the design of interventions (Sabzpoushan, Pourhasanzade, 2018).

For example, the work of researchers from the University of Vigo (Universidade de Vigo, Spain) and the University of Minho (Universidade do Minho, Portugal) examines sequential and parallel algorithms as applied to three-dimensional modeling of individual molecules in complex structures using an agent-based approach. The space for all simulations is a real and measurable object (bacterial cytoplasm). The approaches developed make it possible to determine the arrangement of molecules with a sufficiently high accuracy to reveal possible critical states of the objects under study. In addition, these approaches are implemented in a cross-platform application, which facilitating the construction of three-dimensional models on several hardware platforms and operating systems (Pérez-Rodríguez et al., 2016).

Agent-based modeling in medicine

An agent-based parallel-computing model of intestinal epithelium has been developed at the University of Chicago to simulate ileal inflammation in ulcerative colitis. According to the scientists, the use of an agent-based approach is natural for displaying the activity of billions of cells containing DNA and RNA; on the other hand, processing such an array of information requires the use of supercomputers, and in this regard, researchers have developed a general-purpose spatial model for studying intestinal tissue (Spatially Explicit General purpose Model of Enteric Tissue (SEGMEnT), (Cockrell et al., 2015).

To model more complex processes, for example, simulating the work of all cells of the colon for one year, according to the developers of SEGMEnT, 450,000 processors will be required for 30 hours. And to simulate the cells of the whole organism, taking into account the development of various diseases, the research group links this possibility with the emergence of supercomputers with exascale performance, though algorithmically, SEGMEnT is already capable of this.

Concluding the topic of biological processes, we simply note that agent-based models are also used to study (a) tissue morphogenesis, (b) the spread of invasive plant species, (c) the effect of environmental changes on living organisms, and (d) population dynamics of several interacting species, to name a few related directions.

3. PEDESTRIAN TRAFFIC INCLUDING EVACUATION

Another major application of agent-based modeling is the simulation and optimization of pedestrian and vehicular traffic, congestion modeling, and evacuation.

As an example, a model developed at the University of Western Australia and the University of Murdoch (Australia) considers the pilgrimage to Mecca, including the ritual of stoning the Shaitan, the culminating part of the Hajj. The number of pilgrims is constantly increasing (except for 2020 due to COVID-19), and therefore, the number of casualties is also increasing — due to illness, heat, accidents and, mainly, crush injuries. During the Shaitan ritual, the density of the crowd reaches 6–8 persons per square meter, as a result of which in some years the number of victims was more than 2400 persons[8].

Although the Saudi Arabian authorities use modern video monitoring, communications, and crowd analysis software, there is a danger of unexpected problems. In response, the Australian model was developed using an agent-based approach to simulate various scenarios of the Hajj and the mentioned rite through computational experiments. The scenarios included both minor adjustments to the routes, and the introduction of a timetable for pilgrims to travel to individual sections, laying routes for people to pass, and so forth. Through the use of hybrid tools (combining operational monitoring technologies and agent-based simulators), it was possible to optimize flows and significantly reduce the number of casualties (Owaidah et al., 2019).

A different urban congestion model was developed in 2011 by specialists from Epstein's Center at Brookings and the National Center for Computational Engineering at the University of Tennessee. They developed the Los Angeles Plume-Agent Hybrid Model, which uses computational fluid dynamics to calculate the dynamics of airborne toxic contaminants and an agent-based model to simulate pedestrian and vehicular traffic (Fig. 2). The behavior of the model agents is largely determined by fear of exposure to toxic emissions. The high performance computing application allows one to quickly calculate many scenarios and receive forecasts faster than in real time. In practical application these could be interactively transmitted to dispatchers, so to ensure effective selection of escape routes (Epstein, Pankajakshan, Hammond, 2011).

Evacuation issues

Relatedly, scientists at the University of Science and Technology in Krakow (AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza) built an agent-based platform to simulate crowd behavior at various scales — from small rooms to large centers of attraction for a large number of people (e.g., stadiums, high-rise buildings). (Lubaś, Wąs, Porzycki, 2016).

Most of the models considering the movement of agents operate with fairly simple rules of behavior (at *operational* and occasionally *tactical level*). In the model proposed by the authors above, many additional factors affect the decision-making process — the dissemination of information through the broadcasting system, instructions for staff, etc. Depending on the location of the loudspeakers in the venue, the cells differ in the perceived strength of the sound, and the sound fields (SF) can be determined using the following simplified formula: $SF_{x,y} = \{(x', y'): (x' - x)^2 + (y' - y)^2 \le r^2\}$, where x, y are the coordinates of the sound source, and r is the omnidirectional radius of the spherical wave. When the agent enters the zone of sound fields, he can hear the message with probability P_{SF} and change his behavior (go to another emergency exit, increase / decrease speed, etc.). Another important opportunity for adjusting decision-making at the *strategic level* is communication within a group of agents in close proximity (using mobile communication devices) defined by the set (L_i, R_i, S_i), where $L_i = (x_i, y_i)$ is the leader of group i, and x, y are its coordinates; $R_i = (r_1, ..., r_n)_i$ is the rule of group i; $S_i \in \{2, 3, ...,\}$ is the size of the group i; r is a separate rule from the number of possible n; and $i \in \{1, 2, ..., m\}$ is the group index.

The same group conducted simulations for the eastern stand of the Wisla stadium. The total number of agents in the simulation is 11,808, the evacuation time for 95% of agents is 653 seconds, the fastest evacuation is 3 seconds, the slowest is 653 seconds, the average speed of movement of agents is 0.316 m / s. Note that over time, the average speed decreased, a congestion effect associated with the filling of the nearest exits. According to the developers of the simulator, such a result indicates errors in the design of the stadium. Observational data of fans exiting the eastern stand of the Wisla stadium corroborate the simulation results.

For the larger stadium, the Allianz Arena, with a capacity of 70,000 spectators, simulations were carried out for 58,000 agents. The average evacuation time after multiple runs was 1117 seconds; the average

[8] UK Web Publishing: https://www.independent.co.uk/news/world/middle-east/iran-saudi-arabia-murdering-pilgrims-hajj-stampede-a7228466.html

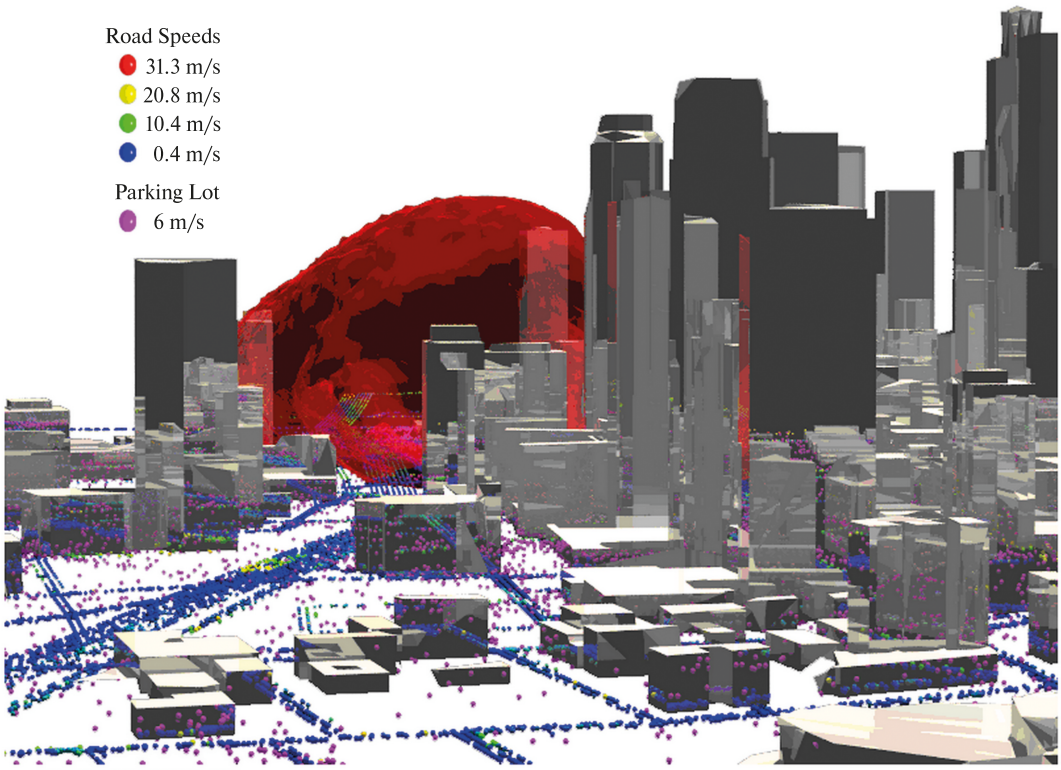


Fig. 2. The result of the model's work — a part of Los Angeles with buildings (rectangles), the plume in the form of a red cloud, and agents (vehicles) colored depending on the speed of movement

A source: Image from "Combining computational fluid dynamics and agent-based modeling: A new approach to evacuation planning" (Epstein, Pankajakshan, Hammond, 2011).

movement speed of agents was 0.726 m / sec. The fastest evacuation was 2 seconds, and the slowest was 1117 seconds (Fig. 3).

Because the simulator can be used to identify bottlenecks in the evaluated venues (stadiums, buildings, etc.), it can also be fused with online monitoring systems of crowded areas using CCTV cameras, depth sensors, GPS trackers and other devices. The fusion of such systems and the described model will make it possible to anticipate crowd behavior in real time to forestall hazardous congestions, providing an additional analytical tool for decision support during public events (Lubaś, Wąs, Porzycki, 2016).

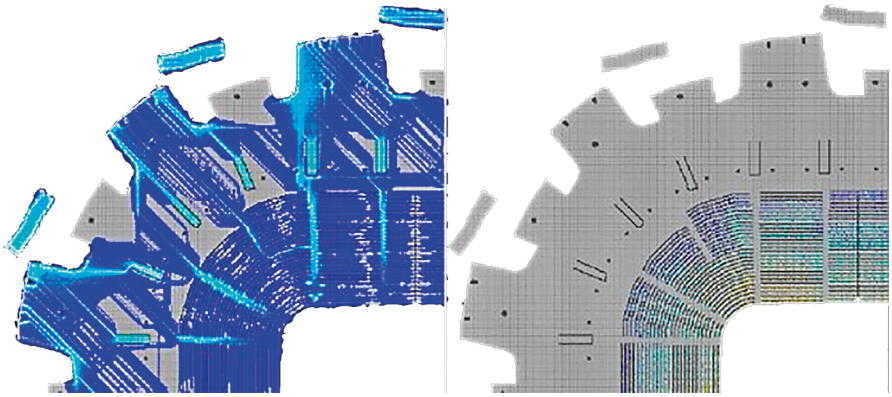


Fig. 3. Visualization of statistics for the evacuation of agents in the lower part of the Allianz Arena stadium: frequency matrix (left), thermal display of evacuation time (right)

A source: Image from "Cellular Automata as the basis of effective and realistic agent-based models of crowd behavior" (Lubaś, Wąs, Porzycki, 2016).

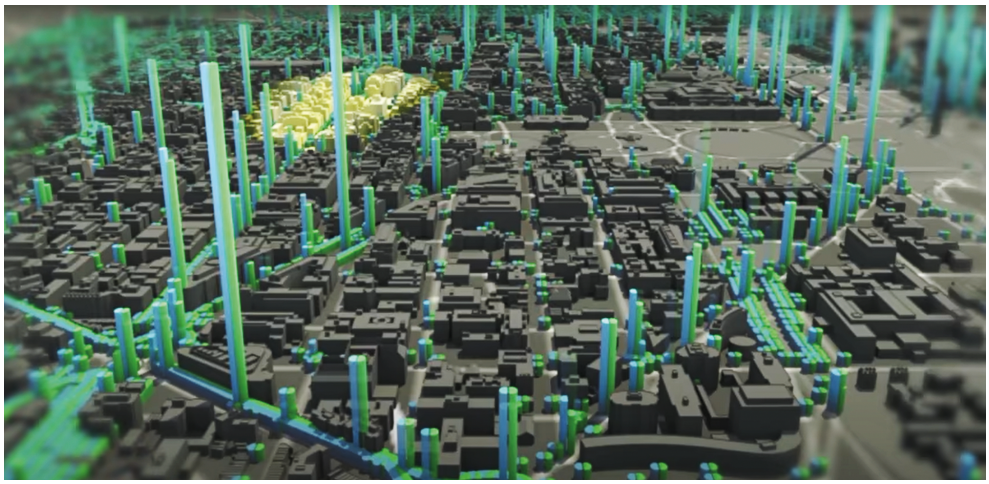


Fig. 4. 3D simulation of the urban landscape in an agent-based model

A source: Image from "What if a nuke goes off in Washington, D.C.? Simulations of artificial societies help planners cope with the unthinkable" (Waldrop, 2018).

In a study by scientists at Tohoku University (Japan) (Makinoshima, Imamura, Abe, 2018), an agent-based model is presented that simulates the process of evacuation in an urban environment as a result of a tsunami collapse. The model was built for technical implementation on supercomputers based on hybrid parallelization technology using the MPI and OpenMP software interfaces. The calculations executed using it demonstrated the high realism of the results obtained. For example, the tsunami caused by the earthquake that occurred on March 11, 2011 in the area of the island of Honshu was reproduced. According to the estimates of seismologists, this was the strongest earthquake in Japan for the entire observation period.

Statistical data on the behavior of a large number of pedestrians were used to adjust the parameters of the model. For example, the speeds of movement of individual agents were determined taking into account

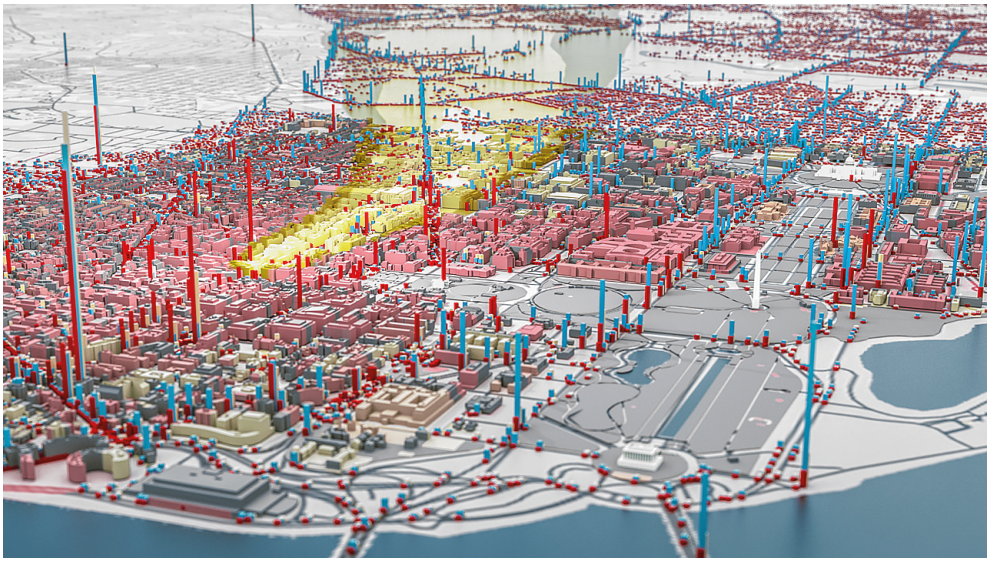


Fig. 5. A plume of radioactive fallout (yellow) stretches east across Washington, D.C., a few hours after a nuclear bomb (of 12 kilotons capacity) goes off near the White House in this snapshot of an agent-based model. Bar heights show the number of people in a particular place and the color indicates their health (red represents sickness or death)

A source: Image from "What if a nuke goes off in Washington, D.C.? Simulations of artificial societies help planners cope with the unthinkable" (Waldrop, 2018).

the average speed of their movement (1.34 ± 0.26 m / s) so that the entire set of numbers corresponded to the normal distribution.

Scientists at Virginia Tech University (now at the Biocomplexity Institute at the University of Virginia) developed an agent-based model for assessing the effectiveness of the United States federal government's response to a nuclear attack on major cities (Washington DC, New York, Los Angeles etc.) which is known as National Response Scenario 1 (Lewis et al., 2013).

Although damage calculations from such an attack were carried out since the middle of the last century, the increased requirements for realistic simulations lead to an agent-based approach. This permits the representation of several million mobile heterogeneous agents, differing across a wide set of parameters and behavior modes, interacting with a detailed multilayer geographic information system containing information on all houses, road networks, facilities, and other infrastructure. Figures 4 and 5 are from simulations for Washington DC.

The Virginia Tech developers calibrated the model as closely as possible to reality, given incomplete data. Some uncertain parameters were estimated by averaging the results from multiple model runs, during which the values of the output indicators were compared with their postulated targets. This calibration of the model was carried out sequentially for each of its parts.

Based on analyses of disaster behavior in numerous emergencies (fires, floods, earthquakes, etc.), the developers argue that in severe crises, the agents' behavioral repertoire shrinks from its normal variety (which might include recreation, for example) to several core options ("seeking refuge," "search for relatives," "search for a doctor," etc.). Accordingly, their behavioral model implementation is minimal.

Supplementing this was data obtained from the American Community Survey, annually carried out by the United States Census Bureau. This is one of the largest such surveys, covering approximately 3.5 million people each year.

The geographic location of the population was customized using data from NAVTEQ, the world's leading manufacturer of digital maps and other data for geographic information systems used both in navigation systems and in numerous online maps.

The population of the artificial Washington metropolitan area, calculated on the basis of statistics, is 4 million people (in reality, according to 2017 data, about 6.2 million), the number of model agents living in the territory subject to the attack is 730 833, and the number of possible locations for them is 146,337.

The health indicators of agents change over time and are calculated based on data from medical examinations of people exposed to radiation.

CEMI RAS model of passenger behavior at an airport

In 2019, CEMI RAS developed an agent-based model of crowd behavior at airports (Makarov, Bakhtizin, Beklaryan et al., 2019). It takes into account the influence of various factors (for example, the number of entrances and exits, the number of check-in counters, physical dimensions of premises, the number of passport control points, waiting time in the baggage claim areas, etc.). It also allows one to determine the best values of the most important resource characteristics of the airport ensuring the elimination (dissipation) of crowd clusters. Computational experiments were carried out using the example of Domodedovo airport (Moscow). Its basic characteristics are presented in Table.

We would note that further parameters are taken into account when modeling the dynamics of passenger traffic at the airport (the waiting time for entering the airport and passing through security scanners, the number and capacity of waiting rooms and business lounges, etc.). Computational experiments were aimed at determining areas of crowd cluster formation (populated areas) that affect the average time spent by an agent-passenger at the airport. In Fig. 6 agents belonging to high-density crowd clusters are highlighted in black, with all other agents highlighted in grey.

According to the calculations, the main factors influencing the formation of crowd clusters at Domodedovo airport are the number of entrances, the number of operating passport control points and the average waiting time at baggage claim areas. One of many combinations that can be explored, is the construction of one more entrance to the airport building, a twofold increase in the number of passport control points, a decrease in the average waiting time at baggage claim areas to a 30 minute maximum, and the opening of 20 additional check-in counters effectively eliminates (dissipates) crowd clusters, reduces queues, and thus improves passenger flow. Here, the agent-based approach made it possible to significantly increase the realism of the results obtained.

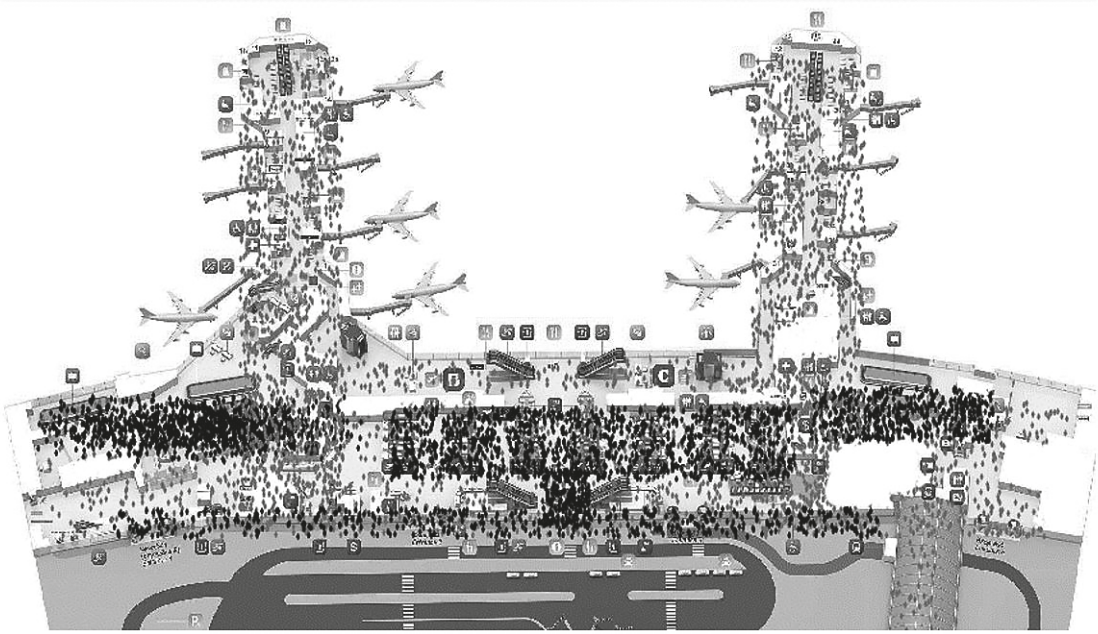


Fig. 6. Distribution of human flows and formation of crowd clusters in the current configuration of the airport interior space. Image from "Development of Software Framework for Large-Scale Agent-Based Modeling of Complex Social Systems" (Makarov, Bakhtizin, Beklaryan et al., 2019)

Table. Basic characteristics of Domodedovo airport affecting the dynamics of passenger traffic

No.	Parameter	Value
1	Average passenger traffic per day	60,000 persons
2	The average number of persons at the same time (including passengers, accompanying persons, employees, etc.)	7,000 persons
3	Total area of all terminals	135 ths. m
4	Number of runways	2
5	Runway capacity (average number of landings per hour)	80
6	Average number of passengers per flight	200 persons
7	Number of check-in counters	130
8	Check-in counter capacity	80 persons / hour
9	Number of self-service kiosks	24
10	Self-service kiosks capacity	20 persons / hour
11	Number of passport control points	128
12	Passport control point capacity	10 persons / hour
13	Number of inspection lines in the pre-flight control area	15
14	Inspection lines capacity	360 persons / hour
15	Average waiting time in the baggage claim area	20 min
16	Number of airport entrances	4

Lord of the rings

As an interesting aside, agent-based models have found applications outside the sciences. One area is entertainment, for example, in the film industry. In the early 2000s, the MASSIVE software product (Multiple Agent Simulation System in a Virtual Environment) was developed. It can simultaneously process tens, hundreds of thousands and up to millions of animated objects, such as pedestrians and vehicles[9]. MASSIVE was originally developed during the filming of "The Lord of the Rings." The Director made a request for software realistically animating the interaction of many software entities, such as in virtual crowds and armies. Stephen Regelous, the founder of MASSIVE, answered the call by applying the concept of artificial societies. This was a breakthrough for the film industry, since the previously used stop-motion

[9] MASSIVE product website: http://www.massivesoftware.com

animation technologies no longer met the needs of film producers and viewers. For "The Lord of the Rings," about 200,000 agents were generated, each of which had primitive rules of behavior: dodge obstacles; follow the direction of general movement; leave if dissimilar to nearest neighbours in the crowd, etc.

While new to the film industry, earlier models of this type included the famous "Boids" flocking and obstacle-avoiding model of Craig Reynolds (Reynolds, 1987) and the Artificial Life models of Christopher Langton at the Santa Fe Institute.

Steph. Regelous received numerous awards from film industry for advances in the technology behind MASSIVE, including the "Oscar" for scientific and engineering achievements (Scientific and Engineering Award) and for the autonomous animation system of agents used for action scenes in "The Lord of the Rings" trilogy[10], which led to its applications in many other hit films[11].

MASSIVE is an example of a very successful application of the agent-based approach in the film industry, particularly for animating geographically distributed battle scenes.

Of course, none of these animated battles were compared to actual wartime battle data. Therefore, this entire line of work, while a delightful (and lucrative) application of simple agents, is not properly part of the method's scientific advance, to which we now return.

4. DEMOGRAPHIC PROCESSES MODELING

Demographic processes are natural objects for agent-based modeling, as individual level phenomena like birth rates, mortality, and migration generate aggregate spatio-temporal population dynamics. Not surprisingly, demography is a widespread area of the agent-based approach application. It is enough to mention here some distinctive works published over the last years.

Agent-based models of social interactions and demographic behavior include (Billari et al., 2007; Diaz, 2010). These authors considered such components of the demographic system, as marriage and changes in the birth rate, etc. In addition, these works investigated differences in peoples' behavior of different cultures associated with corresponding differences in reproductive norms and behavior.

Artificial population models include models by (Silverman et al., 2013, 2014). These models include agents having complex structures and a large number of states, that makes it possible to predict demographic dynamics at various levels — from households to the entire population of the UK.

Diverse applications of agent-based modeling to simulate processes associated with population movement — from the creation of married couples and the impact of social norms on the birth rate, to residential decision-making — were presented in the book "*Agent-Based Computational Demography. Using Simulation to Improve Our Understanding of Demographic Behavior*" (Billari, Prskawetz, 2003).

Scientists from Tel Aviv University and New York University (Benenson, Orner, Hatna, 2003) developed an impressive agent-based model considering the population of Yaffo (an area of about 7 km^2 to the south of Tel Aviv officially called Tel Aviv–Yaffo). The ethnic composition of this settlement is as follows — the Jewish majority (70%) and the Arab minority (30%), which tends to increase. The principal result obtained during the experiments was: the resettlement of resident agents in the area depends to a great extent on the ethnic composition of neighbors.

Earlier, we discussed Multi-Agent Systems and Distributed Artificial Intelligence as areas related to agent-based models. Another and powerful relative of agent-based modeling is Stochastic Microsimulation. These are detailed individual-based models, but agents do not interact directly with one another, as in the classic agent-based models. Rather, agents' states and behaviors, like one's retirement age, are updated by drawing from distributions. When these are known, the method is capable of reproducing observed patterns accurately, and is a crucial step toward full "agentization" (on agentization, see (Guerrero, Axtell, 2011)). CEMI RAS developed these models as well, at several scales.

In 2014, the Strategy of Economic and Social Development of St. Petersburg to 2030 was developed (under the guidance of a foreign member of the Russian Academy of Sciences V.L. Kvint) and adopted for implementation in St. Petersburg. The general goal of the Strategy is "to ensure a stable improvement in the

[10] Section of the official website of the American Academy of Motion Picture Arts and Sciences, dedicated to the awards ceremony in 2004: https: //www.oscars.org/sci-tech/ceremonies/2004

[11] "Avatar," "Edge of Tomorrow," "Tron: Legacy," "2012," "Harry Potter," "Pirates of the Caribbean," "King Kong," "Ben Hur," "Aquaman," "Resident Evil," "300," "I, Robot," "Godzilla," "Pompeii," "Game of Thrones" among others.

quality of life of citizens and increase the global competitiveness of St. Petersburg based on the implementation of national development priorities, provision of sustainable economic growth and use of the results of innovative and technological activities."

One of the main metrics for growth of the city's economy, and the main measure of success of its socio-economic policy is human capital accumulated by the residents of the city. Indeed, the first subject of the Strategy is "Human capital development."

The goal of CEMI RAS was to develop an individual-based model of St. Petersburg to be used as a planning tool for implementation of the Strategy and to test various control actions in the course of computer experiments. It is no accident that CEMI RAS chose a bottom up individual-based approach. There are many examples of its successful applications to model the emergence of real urban agglomerations from the interaction of agents corresponding to various types of economic actors (Rui, Ban, 2010; Semboloni et al., 2004; Monticino et al., 2006).

The first stage of the work was to create a demographic model of St. Petersburg. It was required to accurately reproduce the age/gender structure of the city's population at the predetermined initial point of time, and also to adequately simulate processes of natural movement of this population.

At the beginning of the model's operation, arrays of initial information are found in the empirical database. These data include characteristics of the municipal districts of St. Petersburg, demographic data including the age pyramid, the distribution of population by municipal districts, mortality rates by gender and age, the total birth rate (the average number of children born by a woman during the reproductive period), as well as the distribution of births by the age of the mother.

After that a population of agents (50,000) is created. They are assigned individual characteristics — like gender and age structure — in such a way that structure of the artificial population accurately reproduces the one

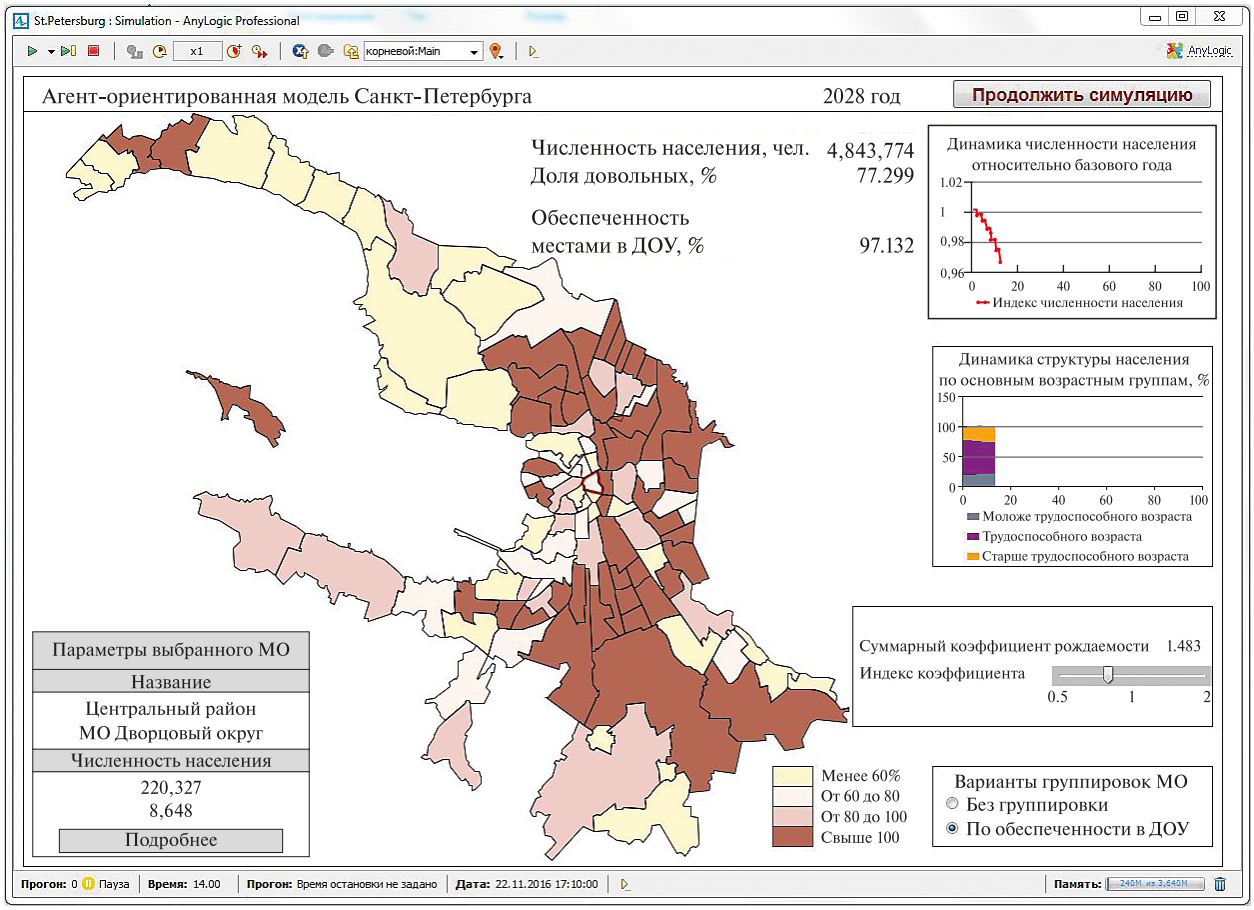


Fig. 7. Main working screen of the Social Petersburg model with an open project creation dialog

A source: Image from "Software and analytical complex 'MÖBIUS' — a tool for planning, monitoring and forecasting the socio-economic system of Russia" (Bakhtizin et al., 2020).

calculated on the basis of the initial input data. The created agents are then settled in municipal districts (with a common age sructure). Thus, an empricially accurate starting state of the agent-based system is established.

From there, the program iterates forward in time. Dynamics of the city's population — as well as mortality and birth rates — are simulated step by step (one iteration of the model corresponds to one calendar year).

From mortality rate distributions differentiated by gender and age, the probability of dying for each agent of the population is drawn. After that its fate is determined in this probabilistic manner, some agents are removed, and the rest became one year older.

Then, based on the number of women of reproductive age, the total birth rate, and the distribution of births by the mother's age, the probability of having a child for women of each age was calculated. After that, it was probabilistically determined for each female agent of reproductive age, whether she would give birth to a child in the current year. If so, a new agent (aged zero) was created — the mother's place of residence in the municipal district. It was assigned the male or female gender with a probability of 0.512/0.488 and iterated forward as described.

To track the state of the model, and for the user to institute various control actions, the main indicators of the simulation are shown on model interface screens at each step of the simulation (e.g., the number, the proportion of satisfied residents). The working screen of the model interface is shown in Fig. 7.

The working screen also contains a schematic map of the city, grouping municipal districts forecasted for the current year in terms of the provision of the population with places in preschool establishments.

In addition, the screen shows the following diagrams: the dynamics of population change relative to the base year (also one of the target indicators for the St. Petersburg Development Strategy) and the dynamics of the population structure by the main age groups — the employable (able-bodied) population, as well as younger and older cohorts.

The user can also select (mouse click) any district on the schematic map and open (click) the window of the corresponding municipal district. The adjustable parameter of the model is the index of aggregate birth rate. The user can change this in the course of the model's operation.

Given the detailed elaboration of the social system and the need to assess the level of life satisfaction of *individuals*, the agent-level approach turned out to be a more effective and realistic means of Strategy monitoring than other tools.

The Russian demographic model

A bigger example is the Russian demographic model (140 million individual agents). It was developed in 2011, and since was being constantly updated since. The model was tested against real data according to the following metrics: a) the quality of reconstructing the age/gender structure of the population using agents both in the country as a whole and in the context of the regions; b) model stability and low error of the obtained results of forecasting the main demographic indicators in comparison with the variants of the official forecast provided by the Federal State Statistics Service; c) the efficiency of program code parallelization when running on supercomputers.

The initial information for the model is the following statistical data for the base year:

- at the level of the country as a whole:
  - distribution of the population by gender and age (age/gender pyramid), thousand people;
  - mortality rates (per 1000 people) differentiated by gender and age;
  - retirement age for men and women by years of the transition period corresponding to the 2018 pension reform;
- at the level of individual regions:
  - population, thousand people;
  - share of the population under the working age,%;
  - share of the population of the working age,%;
  - share of the population over the working age,%;
  - aggregate birth rate;
  - distribution of births by the age of mothers (share of births attributable to mothers from cohorts of five-year age intervals within the reproductive age: 15–19; 20–24; 25–29; 30–34; 35–39; 40–44 and 45–49 years),%.

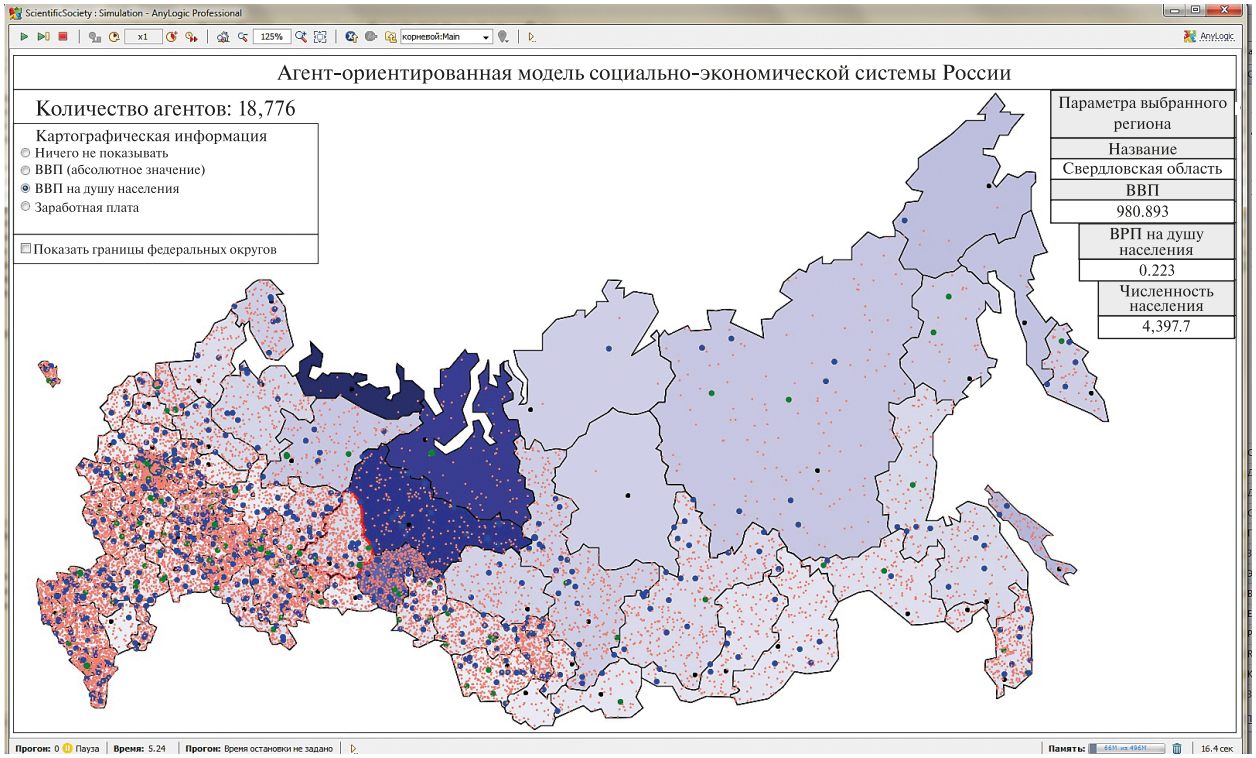


Fig. 8. Working window of the agent-based demographic model of Russia

A source: Image from "Social modeling is a new computer breakthrough (agent-based models)" (Makarov, Bakhtizin, 2013).

At the beginning of the model's operation (initialization), the model loads the initial data, scaling the given number of agents by region and creating the calculated number of agents. It then determines values of individual properties associated with the simulated processes of population reproduction for each agent. According to the simulation algorithms, these properties are: the agent's age, gender, the maximum desired number of children in the family and the number of children already born. In addition, the agent "remembers" its family ties. Its individual collections (lists) are used in this case — collections of parents, children, brothers and sisters, and other relatives.

Agents' age and gender values are distributed in such a way as to reproduce as accurately as possible the age/gender structure of the population specified in the initial data both for the country as a whole and at the level of particular regions. For this purpose, further scaling of the obtained values related to the number of agents in each region was performed: (a) by shares of the main age groups of the population in each region: younger than the working age, the working age, and older than the working age (taking into account the observed retirement ages for women and men for the base year); and also (b) by shares of each age cohort in the population.

The obtained values of the shares of the total number of agents within a region are then used as the probabilities of a particular age for an agent in a given region. A specialized auxiliary module was developed to carry out such scaling and obtain the age (life years) for each agent. The gender of an agent is also determined in a probabilistic way taking into account the gender ratio for the obtained age cohort.

In the model the maximum desired number of children in a family is a random variable from one to seven with a given beta distribution shifted to the left (the maximum value is two children). A specialized auxiliary module was also developed to determine the specific value of the desired number of children for each agent.

The stage of establishing family ties between agents is executed after gender and age properties are assigned. First, a "mother" is selected for each agent from the collection of agents of the same region. This is a female agent of a random age having the number of children, which is less than the maximum desired number. The ages of mother-agents are based on the distribution of births by the age of mothers given in the initial data. As model runs proceed, the number of children of the chosen mother-agent increases, and the child-agent, mother-agent, and mother's closely related agents introduce new relatives in the corresponding collections.

Fig. 8 shows the working window of the developed model (the points are agents). During the system's operation it is possible to obtain the latest information on the socio-economic situation of all regions of

Russia (including with the use of cartographic information that changes in real time depending on the values of endogenous variables).

In the computer experiments aimed at forecasting the main demographic characteristics of the population, the model showed good results when tested according to the performance metrics discussed above (accurate age/gender stucture, model stability, and code efficiency). Testing these metrics was fundamentally important, since the model was developed as a testing ground for developing socio-economic policies and assessing their consequences. Particularly when computer simulations produce *counterintuitive* policy approaches, it is crucial the model be credible empirically. Program efficiency is also important from a practical standpoint.

To estimate the efficiency of the algorithms used to parallelize the agent-based model, CEMI RAS evaluated the dependence of the acceleration of parallel computations on the number of processors with curves constructed in accordance with Amdahl's law. Runs were also carried out using the resources of the Lomonosov Moscow State University (supercomputer "Lomonosov-2") and the National Supercomputer Center of the People's Republic of China (supercomputer "Tianhe-2") to test the portability of the software package. The absolute value of the simulation time due to newer processors in these cases was lower, but the acceleration curves remained the same. Since agent mobility is crucial in many spheres, from urban dynamics to epidemic ones, agent-based transportation modeling is another highly active sphere of application. Indeed, it is fair to say that ABMs are displacing partial diffeential equations in several applications.

5. TRANSPORT SYSTEMS MODELING

Argonne National Laboratory developed software for building agent-based models to simulate traffic flows (Fig. 9). The main utilities of the developed package, named POLARIS, are as follows: 1) a module

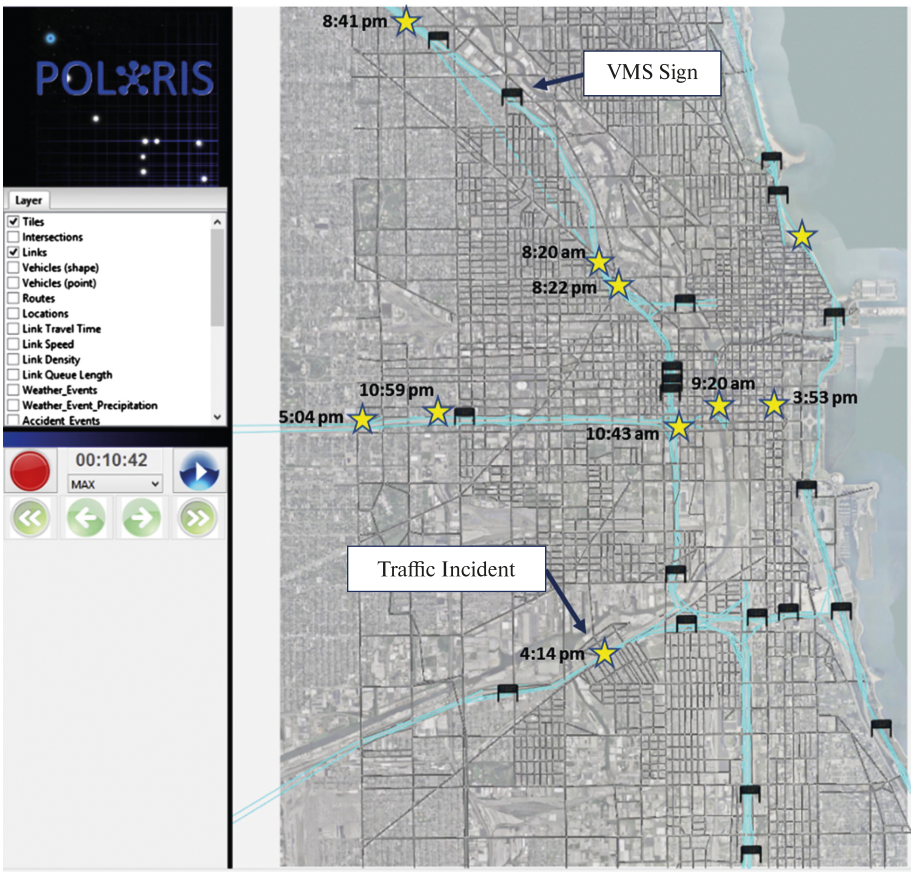


Fig. 9. Road network editor

A source: Image from "POLARIS: Agent-based modeling framework development and implementation for integrated travel demand and network and operations simulations" (Auld et al., 2016).

responsible for parallel processing of events; 2) a module implementing interprocess communication; 3) a library for visualization; 4) a library for data input/output, etc.

The POLARIS software platform allows integrating various procedures (distribution of traffic flow calculations among processors, agents' demand for trips) within a single model with a shared memory that processes all events occurring during urban system simulation (Auld et al., 2016).

The project developers note that until recently individual components of models considering transport systems, such as traffic flows, gas emissions, the formation of a request for a particular type of urban transport, and other factors were not simultaneously taken into account. However, it is precisely the nonlinear interactions among these dynamics that is of greatest concern. Hence, the need for high performance integrated traffic modeling frameworks like POLARIS, whose in interface for Chicago Central Area is shown in Fig. 9.

Experts from IBM Research Laboratory in Tokyo in cooperation with the scientists from the Tokyo Institute of Technology developed a platform for building large-scale traffic flow simulators using the new X10 parallel programming language (Suzumura et al., 2012). Experiments with the developed models for more than 100 cities around the world demonstrated a linear performance gain depending on the number of processor cores used.

In addition to the platform mentioned, a traffic flow simulator called Megaffic (derived from IBM Mega Traffic Simulator) was developed. It also uses the X10 programming language developed for parallel programming. This language is essentially an extension of the Java language with additional support for arrays and processes, as well as shared global address space.

Agent-based model of the Moscow transport system

In turn, CEMI RAS developed an agent-based model of the Moscow city transport system, which makes it possible to assess the consequences of changes in its operation within the framework of urban agglomeration resulting from: 1) the introduction of new radial or circular highways; 2) temporary closure or elimination of any element of the transport system; 3) introduction of economic sanctions (highway toll, congestion charge etc.).

The greatest challenge in building the model was a shortage of detailed inter-district traffic data. A common surrogate in such cases is to use a so-called "gravity model." This class of model assumes that the traffic from one district to another varies directly with the capacity of the arrival and departure districts and

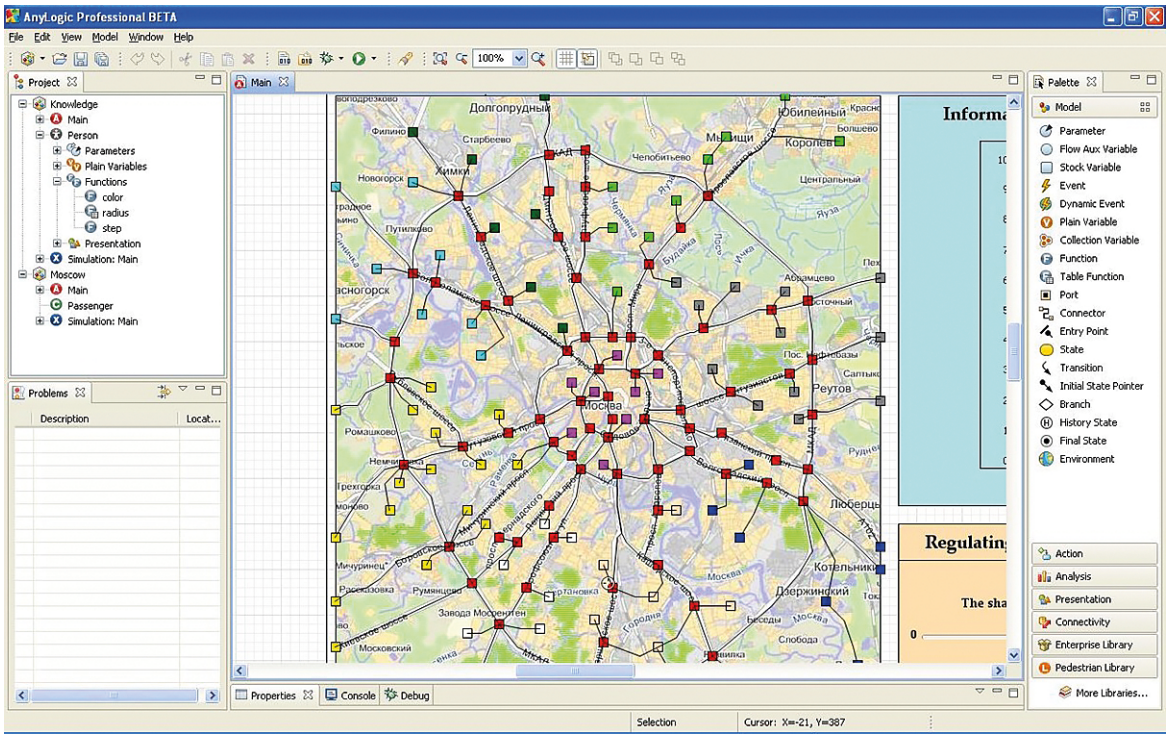


Fig. 10. Implementation of Moscow city transport network using AnyLogic package

A source: Image from "Social modeling is a new computer breakthrough (agent-based models)" (Makarov, Bakhtizin, 2013).

inversely with the distance (or cost of travel) between these districts. Typically, the denominator is the distance raised to a power (estimated econometrically); hence its name.

There are three Types of agents in the Moscow model: 1) agents (persons) intending to get from point A to point B; 2) passenger cars carrying an average of two people; and 3) a public transport carrying approximately 150 people.

Agents of the first Type make a decision on the choice of transportation mode, i.e. on the choice of an agent of the second or third Type (based on of factors discussed below). Agents of the second and third Types are tied to an animation diagram that changes in real time, according to their speed of movement and location at time *t*, all of which varies with the specific situation.

The animation diagram is a city map (in this case, Moscow, although this is not essential) elaborated up to the level of major transport arteries (Fig. 10).

When modeling, we determined the behavior of individual agents, while more general phenomena — traffic jams or a parameter reflecting the level of traffic congestion — emerge from the bottom-up in the process of the model's operation. As discussed at the outset, a distinct advantage of agent-based modeling is the ability to generate global dependencies and patterns through agent interactions *without prior knowledge of them*. It is crucial to credibly represent the logic of individual agent behavior. While this is an empirical challenge (as in all social sciences) we could not have built a more realistic simulator with other tools.

REFERENCES / СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Auld J., Hope M., Ley H., Sokolov V., Xua B., Zhang K. (2016). POLARIS: Agent-based modeling framework development and implementation for integrated travel demand and network and operations simulations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, March, 101–116.

Bakhtizin A.R. (2008). Agent-based models of the economy. Moscow: Ekonomika (in Russian). [**Бахтизин А.Р.** (2008). Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика.]

Bakhtizin A.R., Ilyin N.I., Khabriev B.R., Makarov V.L., Sushko E.D. (2020). Software and analytical complex "MÖBIUS" — a tool for planning, monitoring and forecasting the socio-economic system of Russia. *Artificial Societies*, 15 (4). DOI: 10.18254/S207751800012303–2 (in Russian). [**Бахтизин А.Р, Ильин Н.И., Хабриев Б.Р., Макаров В.Л., Сушко Е.Д.** (2020). Программно-аналитический комплекс «МЁБИУС» — инструмент планирования, мониторинга и прогнозирования социально-экономической системы России // *Искусственные общества*. Т. 15. № 4.]

Benenson I., Orner I., Hatna E. (2003). Agent-based modeling of householders' migration behavior and its consequences. *Contributions to Economics,* 97–115. DOI: 10.1007/978-3-7908-2715-6_6

Billari F.C., Prskawetz A. (Eds.) (2003). *Agent-based computational demography: Using simulation to improve our understanding of demographic behaviour*. Heidelberg: Physica-Verlag. 210 p.

Billari F.C., Prskawetz A., Diaz B.A., Fent T. (2007). The "Wedding-Ring": An agent-based marriage model based on social interaction. *Demographic Research*, 17, 3, 59–82.

Boulmakoul A., Karim L., Lbath A. (2021). Vehicle-pedestrian interaction: Distributed intelligence framework. *Procedia Computer Science*, 184, 68–75. DOI: 10.1016/j.procs.2021.03.019

Brauer F. (2005). The Kermack-McKendrick epidemic model revisited. *Mathematical Biosciences*, 198, 2, 119–131. DOI: 10.1016/j.mbs.2005.07.006

Cockrell R.C., Christley S., Chang E., An G. (2015). Towards anatomic scale agent-based modeling with a massively parallel spatially explicit general-purpose model of enteric tissue (SEGMEnT_HPC). *PLOS ONE*, 10(3): e0122192. DOI: 10.1371/journal.pone.0122192

Cook M. (2004). Universality in Elementary Cellular Automata. *Complex Systems*, 15.

Diaz B.A. (2010). *Agent-based models on social interaction and demographic behaviour* (Ph.D. Thesis). Wien: Technische Universität. 93 p.

Ehikioya S., Zhang C. (2018). Real-time multi-agents architecture for e-commerce servers. *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 6, 2, 88–98. DOI: 10.2991/ijndc.2018.6.2.4

Epstein J.M., Axtell R. (1996). *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. Washington: Brookings Institution Press, The MIT Press.

Epstein J.M. (1999). Agent-based computational models and generative social science. *Complexity*, 4, 5, 41–60. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0526(199905/06)4:5<41:: AID-CPLX9>3.0.CO;2-F

Epstein J.M. (2006). *Generative social science: Studies in agent-based computational modeling*. Princeton: Princeton University Press. 352 p.

Epstein J.M. (2009). Modeling to contain pandemics. *Nature*, 460, 687 (2009). DOI: org/10.1038/460687a

Epstein J.M. (2013). *Agent_Zero: Toward neurocognitive foundations for generative social science*. Princeton: Princeton University Press. 249 p.

Epstein J.M., Hatna E., Crodelle J. (2021). Triple contagion: A two-fears epidemic model. *Journal of the Royal Society Interface*, 18, 81. DOI: 10.1098/rsif.2021.0186

Epstein J.M., Pankajakshan R., Hammond R.A. (2011). Combining computational fluid dynamics and agent-based modeling: A new approach to evacuation planning. *PLOS ONE*, 6, 5. e20139. DOI: 10.1371/journal.pone.0020139

Epstein J.M., Parker J., Cummings D., Hammond R.A. (2008). Coupled contagion dynamics of fear and disease: Mathematical and computational explorations. *PLOS ONE*, 3, 12. e3955. DOI: 10.1371/journal.pone.0003955

Gardner M. (1970). The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 4, October.

Guerrero O.A., Axtell R.L. (2011). Using agentization for exploring firm and labor dynamics. In: S. Osinga, G. Hofstede, T. Verwaart (Eds.) *Emergent results of artificial economics*. Lecture notes in economics and mathematical systems, vol. 652. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978–3–642–21108–9_12

Hatna E., Benenson I. (2015). Combining segregation and integration: Schelling model dynamics for heterogeneous population. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18 (4), 15. Available at: http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/4/15.html DOI: 10.18564/jasss.2824

Ilie S., Bădică C. (2010). Distributed multi-agent system for solving traveling salesman problem using ant colony optimization. In: M. Essaaidi, M. Malgeri, C. Badica (Eds.). *Intelligent distributed computing IV. Studies in computational intelligence*, vol. 315. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-15211-5_13

Ilie S, Bădică C. (2013). Multi-agent distributed framework for swarm intelligence. *Procedia Computer Science*, 18, 611–620. DOI: 10.1016/j.procs.2013.05.225

Janbi N., Katib I., Albeshri A., Mehmood R. (2020). Distributed artificial intelligence-as-a-service (DAIaaS) for smarter IoE and 6G Environments. *Sensors*, 20 (20), 5796. DOI: 10.3390/s20205796

Kermack W.O., McKendrick A.G. (1927). A contribution to the mathematical theory of epidemics. Proceedings of the Royal Society of London. *Series A. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 115, 772, 700–721, 1927. DOI: 10.1098/rspa.1927.0118

Langton C.G. (1989). Artificial life. In: C.G. Langton (Ed.). *Artificial Life. SFI Studies in the Sciences of Complexity*. Vol. VI. Cambridge, London: Addison-Wesley.

Lewis B., Swarup S., Bisset K., Eubank S., Marathe M., Barrett C. (2013). A simulation environment for the dynamic evaluation of disaster preparedness policies and interventions. *Journal of Public Health Management and Practice* (JPHMP), 19, Suppl. 2 (02), S42–S48. DOI: 10.1097/PHH.0b013e31829398eb

Longini I.M., Halloran M.E., Nizam A., Yang Y., Xu S., Burke D.S., Cummings D.A., Epstein J.M. (2007). Containing a large bioterrorist smallpox attack: A computer simulation approach. *International Journal of Infectious Diseases*, 11, 2, 98–108. DOI: 10.1016/j.ijid.2006.03.002

Lubaś R., Wąs J., Porzycki J. (2016). Cellular automata as the basis of effective and realistic agent-based models of crowd behavior. *The Journal of Supercomputing*, 72, 6, 2170–2196. DOI: 10.1007/s11227-016-1718-7

Makarov V.L., Bakhtizin A.R. (2013). *Social modeling is a new computer breakthrough (agent-based models)*. Moscow: Ekonomika (in Russian). [**Макаров В.Л., Бахтизин А.Р.** (2013). Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика.]

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2019). Development of software framework for large-scale agent-based modeling of complex social systems. *Software Engineering (Programmnaya Ingeneria)*, 10, 4, 167–177 (in Russian). [**Макаров В.Л.**, **Бахтизин А.Р.**, **Бекларян Г.Л.**, **Акопов А.С.** (2019). Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем // *Программная инженерия*. Т. 10. № 4. С. 167–177. DOI: 10.17587/prin.10.167–177.]

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2020). Agent-based model as a tool for controlling environment of the region. *Journal of the New Economic Association*, 45, 151–171. DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6 (in Russian). [**Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** (2020). Агент-ориентированная модель как инструмент регулирования экономики // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 45. С. 151–1712.]

Makarov V.L., Wu J., Wu Z., Khabriev B.R., Bakhtizin A.R. (2019). Modern tools for evaluating the effects of global trade wars. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 89, 7, 432–440. DOI: 10.1134/S1019331619040063 (in Russian). [**Макаров В.Л., Ву Ц., Ву З.** и др. (2019). Современные инструменты оценки последствий

мировых торговых войн // *Вестник Российской академии наук*. Т. 89. № 7. С. 745–754. DOI: 10.31857/S0869-5873897745-754]

Makarov V.L., Wu J., Wu Z., Khabriev B.R., Bakhtizin A.R. (2020). World trade wars: Scenario calculations of consequences. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 90, 2, 88–97. DOI: 10.1134/S1019331620010207 (in Russian). [**Макаров В.Л., Ву Ц., Ву З., Хабриев Б.Р., Бахтизин А.Р.** (2020). Мировые торговые войны: сценарные расчеты последствий // *Вестник Российской академии наук*. Т. 90. № 2. С. 169–179.]

Makinoshima F., Imamura F., Abe Y. (2018). Enhancing a tsunami evacuation simulation for a multi-scenario analysis using parallel computing. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 83, 36–50. DOI: 10.1016/j.simpat.2017.12.016.

Monticino M.G., Brooks E., Cogdill T., Acevedo M., Callicott B. (2006). Applying a multi-agent model to evaluate effects of development proposals and growth management policies on suburban sprawl. *Proc. of the international environmental modelling and software society. Summit on Environmental modelling and software*. Burlington (USA).

Owaidah A., Olaru D., Bennamoun M., Sohel F., Khan N. (2019). Review of modelling and simulating crowds at mass gathering events: Hajj as a case study. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22 (2), 9. Available at: http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/2/9.html DOI: 10.18564/jasss.3997.

Parker J., Epstein J.M. (2011). A distributed platform for global-scale agent-based models of disease transmission. ACM transactions on modeling and computer simulation: A publication of the Association for computing machinery, 22 (1), 2. DOI: 10.1145/2043635.2043637

Pérez-Rodríguez G., Pérez-Pérez M., Fdez-Riverola F., Lourenço A. (2016). High performance computing for three-dimensional agent-based molecular models. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 68, 68–77.

Piontti A.P., Perra N., Rossi L., Samay N., Vespignani A. (2018). *Charting the next pandemic: Modeling infectious disease spreading in the data science age*. Social Sciences. Springer Internat. Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-93290-3

Pourhasanzade F., Sabzpoushan S., Alizadeh A.M., Esmati E. (2017). An agent-based model of avascular tumor growth: Immune response tendency to prevent cancer development. *Simulation*, 93 (8), 641–657. DOI: 10.1177/0037549717699072

Reynolds C.W. (1987). Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'87). *ACM*, 21 (4), 25–34. DOI: 10.1145/37401.37406

Rui Y., Ban Y. (2010). Multi-agent simulation for modeling urban sprawl in the greater toronto area. *Proc. of the 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*. Guimarães (Portugal).

Sabzpoushan S.H., Pourhasanzade F. (2018). A new method for shrinking tumor based on microenvironmental factors: Introducing a stochastic agent-based model of avascular tumor growth. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 508, 771–787. DOI: 10.1016/j.physa.2018.05.131

Semboloni F., Assfalg J., Armeni S., Gianassi R., Marsoni F. (2004). CityDev, an interactive multi-agents urban model on the web. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, 1, 45–64.

Schelling T.C. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1 (2), 143–186.

Silverman E., Bijak J., Hilton J., Cao V.D., Noble J. (2013). When demography met social simulation: A tale of two modelling approaches. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, 16 (4), 9. Available at: http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/9.html

Silverman E., Bijak J., Noble J., Cao V., Hilton J. (2014). Semi-artificial models of populations: Connecting demography with agent-based modelling. In: S.-H. Chen et al. (Eds.). *Advances in computational social science: The Fourth world congress*. Agent-Based Social Systems 11, Springer Japan, 177–189. DOI: 10.1007/978-4-431-54847-8_12

Sugumaran V. (2009). Distributed artificial intelligence, agent technology, and collaborative applications. IGI Global. DOI: 10.4018/978-1-60566-144-5

Suzumura T., Kato S., Imamichi T., Takeuchi M., Kanezashi H., Ide T., Onodera T. (2012). X10-based massive parallel large-scale traffic flow simulation. In: *Proceedings of the 2012 ACM SIGPLAN X10 Workshop (X10 '12*). Association for Computing Machinery. New York, USA. Article 3, 1–4. DOI: 10.1145/2246056.2246059

Waldrop M.M. (2018). *What if a nuke goes off in Washington, D.C.? Simulations of artificial societies help planners cope with the unthinkable*. Science AAAS by M. Mitchell Waldrop. Apr. 12. DOI:10.1126/science.aat8553

Wolfram S. (2002). *A new kind of science*. Wolfram Media. ISBN: 1-57955-008-8. Available at: www.wolframscience.com

Yadav S.P., Mahato D.P., Linh N.T.D. (Eds.) (2020). *Distributed artificial intelligence: A modern approach*. 1st ed. CRC Press. DOI: 10.1201/9781003038467

Агент-ориентированное моделирование для сложного мира. Часть 1

© 2022 г. В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Дж.М. Эпштейн

В.Л. Макаров,
академик РАН, крупнейший в России специалист в области компьютерного моделирования социально-экономических процессов; научный руководитель Центрального экономико-математического института РАН; президент Российской экономической школы; директор Высшей школы государственного администрирования МГУ, Москва; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru

А.Р. Бахтизин,
член-корреспондент РАН; директор Центрального экономико-математического института РАН; профессор Московского государственного университета; сертифицированный специалист по CGE моделям (сертификат Всемирного банка); обладатель профессиональных сертификатов компании Microsoft (Microsoft Certified Professional, Microsoft Certified Application Developer, Microsoft Certified Solution Developer), Москва; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

Дж.М. Эпштейн,
профессор эпидемиологии в Школе глобального общественного здравоохранения Нью-Йоркского университета и директор-основатель Лаборатории агентного моделирования Нью-Йоркского университета, аффилированной с Курантовским институтом математических наук; e-mail: je65@nyu.edu

Поступила в редакцию 10.12.2021

Авторы благодарны Елене Бойнович и Милане Сидоренко за помощь в технических вопросах подготовки материалов к изданию.

Исследование подготовлено при материальной поддержке Российского научного фонда (проект 21-18-00136 «Разработка программно-аналитического комплекса для оценки последствий межстрановых торговых войн с приложением для функционирования в системе распределенных ситуационных центров России»).

Аннотация. Основная цель статьи состоит в обобщении избранных разработок в области искусственных обществ и агент-ориентированного моделирования и определении того, как этот принципиально новый инструментарий может способствовать решению некоторых из самых сложных научных и практических проблем нашего времени. Сфера применения агентного моделирования значительно расширилась за последнюю четверть века, вобрав множество направлений в самых разных масштабах — от молекулярного до глобального. Описанные в статье модели являются лишь небольшой частью накопленных в мире научных и практических разработок в сфере агент-ориентированного моделирования. Дается представление о широком спектре областей применения моделей этого класса (эпидемиология, экономика, демография, окружающая среда, городская динамика, история, конфликты, стихийные бедствия и др.), масштабах использования (от биологических клеток до планетарного уровня) и целях разработки (исследовательских, генерации искусственных обществ, решения оптимизационных задач, прогнозирования, оценки геополитических сценариев и т.д.). Агент-ориентированные модели предлагают, с одной стороны, новую и мощную альтернативу, а с другой, дополняют традиционные математические методы решения сложных задач.

Ключевые слова: агент-ориентированные модели, эпидемиология, пешеходное движение, демографические процессы, транспортные системы, экологическое прогнозирование, землепользование, городская динамика, исторические эпизоды, моделирование конфликтов, социальные сети, экономические системы.

Классификация JEL: C63, D91.

Цитирование: **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Эпштейн Дж.М.** (2022). Агент-ориентированное моделирование для сложного мира. Часть 1 // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 5–26. DOI: 10.31857/S042473880018970-6

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 27–37

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Сетевая экономика как социально-экономическая модель

© 2022 г. Е.В. Устюжанина

Е.В. Устюжанина,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: dba-guu@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.09.2021

Аннотация. Статья посвящена анализу фундаментальных изменений, которые происходят в экономике под воздействием цифровых технологий и глобализации хозяйственных связей. Научной гипотезой работы является предположение о кардинальном характере трансформационных процессов, сопоставимых по значимости с промышленной революцией. Методология исследования — исторический, институциональный и системный анализы. Автор предпринял попытку абстрактно-научного разделения технологического, собственно экономического и институционального ракурсов хозяйственного развития. Соответственно выделены понятия: «тип экономики» (технологический аспект), «социально-экономическая модель» (экономическая система) и «способ производства» (институциональный аспект). Показано, что индустриальному типу экономики соответствует рыночная экономическая система, которая может развиваться при различных способах производства — капитализме и этатизме. Аналогично цифровому типу экономики можно поставить в соответствие сетевую экономическую систему, базовыми характеристиками которой являются развитая система разделения труда, прямые долгосрочные кооперационные и информационные связи между экономическими агентами, отношения доверия и взаимозависимость. Отдельное внимание уделено трансформации базовых институтов рыночной экономики в процессе перехода к сетевой экономике. Показано, что перестают действовать имманентные рыночной экономике законы ценообразования, распределения экономического излишка и контроля над хозяйственной деятельностью.

Ключевые слова: сетевая экономика, цифровая экономика, цифровая революция, тип экономики, экономическая система, способ производства, институт стоимости, институт власти.

Классификация JEL: A10, B41, D02.

Цитирование: **Устюжанина Е.В.** (2022). Сетевая экономика как социально-экономическая модель // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 27–37. DOI: 10.31857/S042473880018967-2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЙ. ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС

В настоящее время многие исследователи занимаются определением и описанием основных черт зарождающейся на наших глазах новой экономической реальности. Некоторые авторы называют эту реальность новой экономикой, другие дают более конкретные определения: «экономика знаний» (Макаров, 2013), «постиндустриальная экономика» (Тоффлер, 2020; Белл, 2004), «экономика услуг» (Buera, Kaboski, 2009), «информационная экономика» (Machlup, 1962), «информациональная экономика» (informational society) (Кастельс, 2016), «цифровая экономика» (Negroponte, 1995; Tapscott, 1995), «сетевая экономика» (Shapiro, Varian, 1999; Паринов, 2002). При этом речь, как правило, идет об одном и том же явлении, изучаемом с разных ракурсов.

Целью настоящей работы является попытка сопряжения различных точек зрения на происходящие изменения с помощью абстрактно-научного разделения технологических, экономических и институциональных аспектов развития. Это можно сделать с помощью разграничения трех понятий: «тип экономики», «социально-экономическая модель» и «способ производства» (табл. 1).

Технологический ракурс определяет *тип экономики*. Он формируется такими характеристиками, как основной ресурс хозяйственной деятельности, базисные сферы экономики, характер труда и источники экономического роста. Экономический ракурс — это *социально-экономическая модель*, описывающая систему организации хозяйственной деятельности, схему распределения ресурсов и продуктов, ведущие способы координации взаимодействия — экономическая система общества. Для понимания категории «*способ производства*» (институциональный ракурс) необходимо включить в рассмотрение механизмы присвоения, распределения и направления использования экономического излишка, организацию экономической власти и целевые установки общественного развития (табл. 1).

Таблица 1. Разграничение категорий

Тип экономики	Социально-экономическая модель	Способ производства
Основные ресурсы Базисные сферы экономики Характер труда Источники экономического роста	Система организации хозяйственной деятельности Схема распределения ресурсов и продуктов Способы координации взаимодействия	Основания экономической власти Целевые установки общественного развития Механизмы распределения излишка

Источник: авторская разработка.

Для иллюстрации различия между предложенными категориями обратимся к периодизации истории хозяйственного развития в соответствии с кардинальными изменениями в экономических системах, которые можно назвать хозяйственными революциями (Устюжанина, Сигарев, Шеин, 2017).

Первая хозяйственная революция — *неолитическая* — знаменует собой переход от присваивающей системы организации жизнеобеспечения, когда основными сферами хозяйственной деятельности являлись собирательство, охота и рыболовство, к управлению проблемой ограниченности ресурсов на основе их воспроизводства. Происходит становление *аграрного* типа экономики, в котором основным ресурсом является земля; базисной сферой хозяйственной деятельности — сельское хозяйство; в основе производства лежит простой физический труд людей и прирученных ими животных. Основной источник экономического роста — увеличение количества трудовых усилий и природных ресурсов, вовлекаемых в производство. Одновременно формируется *общинная* модель организации хозяйственной жизни, которая базируется на зарождении внутрихозяйственного разделения труда, кооперации и взаимном согласовании (совещательной координации) в качестве ведущего способа хозяйственного взаимодействия (Дементьев, Евсюков, Устюжанина, 2017). К. Маркс называл соответствующий общественный строй (способ производства) первобытнообщинным (Маркс, 2020). В его основе лежит социально-экономическое равенство членов общины в условиях отсутствия регулярного экономического излишка. Целевая установка хозяйственной жизни общины — обеспечение ее выживания.

Следующую хозяйственную революцию можно назвать *классовой*. Она связана с появлением регулярного экономического излишка вследствие роста производительности труда, что порождает обострение конфликта интересов по поводу присвоения и распределения ресурсов как внутри социально-экономических образований, так и между ними. Как и все хозяйственные революции, она продолжается в течение длительного времени — между общинным и классовым обществом был исторический период, который Т. Веблен называет «эпохой варварства» (Веблен, 2016), а Ю.И. Семенов — «престижной экономикой» (Семенов, 2008).

В результате классовой революции происходит зарождение и становление института государства, а также выстраивание иерархии связей между различными участниками социального взаимодействия — формирование классового общества. Постепенно развивается *военно-аграрный* тип экономики, в котором основным ресурсом, наряду с землей, становится подневольный труд. К базисным сельскохозяйственным и обслуживающим их отраслям добавляется военное дело (захват и защита территорий и пленных), а также ремесленное производство. Усложняется характер труда как за счет развития его орудий, так и за счет совершенствования технологий, прежде всего в ремесленном и военном деле. Экономический рост базируется на двух началах: насильственном перераспределении ресурсов (оккупации) — экстенсивный путь развития, и повышении производительности факторов производства — труда (специализация) и земли (в частности, путем ирригации) — интенсивный путь.

На основе происходящих изменений возникает *сословно-иерархическая* модель организации социально-экономической жизни. Оформляются правовые основы, узаконивающие социально-экономическое неравенство. Ведущими становятся нормативный и административный способы координации. Маркс называл соответствующие этому периоду способы производства *рабовладельческим* и *феодальным* (европейская система), а также *азиатским* (восточная система). Л.В. Васильев называет восточную систему *государственным* способом производства (Васильев, 2011), Ю.И. Семенов — *политарным* (Семенов, 2008), К.А. Виттфогель — *ирригационным* (Латов, 2007). Основное различие между восточными и западными системами заключается в институте земельной собственности: частная (сословная) собственность на Западе и иерархическая собственность на Востоке (Устюжанина, 2006). При этом и в западной, и в восточной системе право правящего класса на экономический излишек (прибавочный продукт) основывается не только на праве собственности на землю, но и на социальном статусе — положении в общественной иерархии (Веблен, 2007).

Несмотря на различие в институте земельной собственности, в основе обоих способов производства, соответствующих сословно-иерархической модели организации хозяйственной жизни, лежат развитая система сословных привилегий (ограничений) и легитимация внеэкономического принуждения. Целевой функцией правящей элиты становится максимизация власти; экономический излишек присваивается привилегированными классами и направляется на усиление своей военной и/или административной мощи, в том числе на содержание аппарата принуждения.

Промышленная революция знаменует собой резкое повышение производительности труда на основе использования энергии природных ресурсов (Тоффлер, 2020). Соответствующий период характеризуется серией технологических революций, связанных с переходами от простейших видов двигателей (водяного и парового) к двигателю внутреннего сгорания, электричеству, ископаемому топливу, атомной энергии. Если раньше в производстве применялась мышечная сила человека или животных, то теперь главным основанием роста производительности становится введение в производство новых источников энергии (Кастельс, 2016). Параллельно развитию энергетики развивается машинное производство, транспорт, металлургия и химическая промышленность. Значимым фактором экстенсивного экономического роста становится колониальная экспансия, которая позволяет, с одной стороны, существенно экономить затраты (использование дешевого труда и других ресурсов периферии), а с другой — расширять рынок сбыта продукции метрополии. Промышленная революция породила новый тип экономики — *индустриальный*.

В индустриальной экономике главным фактором производства становится капитал в форме физических активов (средств производства); базисной сферой хозяйственной деятельности выступает промышленность. Возникает феномен машинного труда: если раньше инструменты труда и простейшие механизмы облегчали труд использующих их работников, то теперь работники начинают обслуживать машины. Основными источниками экономического роста становятся инвестиции в приращение физического капитала.

Индустриальной экономике соответствует *рыночная модель* организации хозяйственной жизни — отделение фирм (предприятий) от домашних хозяйств; производство бóльшей части общественного продукта не для внутреннего потребления, а для обмена; развитая система межхозяйственного разделения труда. В рыночной экономике связи между экономическими агентами имеют характер разовых сделок (торговые трансакции). Ведущими способами координации становятся ценовой и нормативный.

Еще одна социально-экономическая модель, которая может применяться в условиях индустриальной экономики, — *плановая* экономика. В этой модели, наряду с трансакциями встречного перемещения (трансакциями обмена), большое значение имеют трансакции централизованного перераспределения (рационирования), а к ведущим способам координации взаимодействия добавляется административный.

Как и на предыдущем этапе развития, индустриальной экономике соответствуют два способа производства, которые условно можно назвать западным и восточным. На Западе (Европа и Северная Америка) это — *капитализм*, основанный на частной собственности на средства производства, отделении работников от средств производства и превращении рабочей силы в товар. Экономическая власть принадлежит владельцам средств производства (капиталистам) и покоится на их праве на экономический излишек — прибавочную стоимость. Целевыми функциями правящего класса становятся экономический рост и максимизация экономического излишка.

Восточный способ производства М. Кастельс называет *этатизмом*. При этатизме контроль над экономическим излишком находится в руках государства (бюрократии). Этатизм ориентирован на максимизацию власти.

Более наглядно описанные выше этапы развития представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Этапы хозяйственного развития

Хозяйственная революция	Тип экономики	Социально-экономическая модель	Способ производства
Неолитическая	Аграрная	Общинная	Первобытно-общинный
Классовая	Военно-аграрная	Сословно-иерархическая	Феодализм / политаризм
Промышленная	Индустриальная	Рыночная / плановая	Капитализм / этатизм

Источник: разработано автором.

Таблица 3. Основные характеристики различных типов экономики

Тип экономики	Базисные отрасли	Основные ресурсы	Основания экономического роста
Аграрная	Сельское хозяйство	Земля	Количество ресурсов (земля, труд, животные)
Военно-аграрная	Сельское хозяйство, война, ремесло	Земля, подневольный труд	Внеэкономическое перераспределение ресурсов + повышение производительности факторов производства
Индустриальная	Промышленность	Капитал	Введение в производство новых источников энергии + развитие технологий + колониальная экспансия

Источник: разработано автором.

ЦИФРОВАЯ И СЕТЕВАЯ ЭКОНОМИКИ

Происходящую на наших глазах очередную хозяйственную революцию можно назвать цифровой, или информационной, а зарождающийся тип экономики — цифровым.

Первенство за введение в научную дискуссию понятия «*digital economy*» оспаривают два ученых — Дон Тапскотт, опубликовавший в 1995 г. монографию «The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence» (Tapscott, 1995), и Николас Негропонте, выпустивший в том же году книгу «Being Digital» (Negroponte, 1995). Тапскотт первый увидел порождаемый цифровизацией феномен существенного снижения внешних транзакционных издержек и предсказал появление *новых форм ведения бизнеса*, перенос взаимодействия в телекоммуникационные сети. Негропонте обратил внимание на переход от «обработки атомов к обработке битов» и выделил базовые, по его мнению, характеристики новой модели хозяйствования: виртуальность, слабая зависимость от сырьевых ресурсов и мгновенное глобальное перемещение.

К наиболее значимым характеристикам цифровой экономики можно отнести (Устюжанина, Сигарев, Шеин и др., 2017): превращение ИКТ в технологии широкого применения; глобализацию коммуникаций; квантовые, био- и нейротехнологии; вытеснение живого труда роботизированным; перевод значительной части производства в цифровой формат; распространение аддитивных технологий; усиление в экономике роли транзакционных цифровых платформ; искусственный интеллект; технологии виртуальной и дополненной реальности; территориальное рассредоточение участников хозяйственного взаимодействия; совершенствование информационного обеспечения процесса принятия решений; появление электронных денежных средств; переход населения и бизнеса на online-взаимодействие; интернет вещей.

В цифровой экономике главным ресурсом хозяйственной деятельности является информация; базисными сферами деятельности — информационно-коммуникационные. Появляется новый вид низкоквалифицированного труда — компьютерный труд (часть работников превращается в операторов цифровых устройств). Источником роста производительности становится развитие технологий генерирования знаний, обработки информации и организации коммуникаций.

Существует точка зрения, что цифровая революция представляет собой очередной этап в серии технологических революций, характерных для индустриальной экономики (Перес, 2011; Шваб, 2016; Роджерс, 2018). Альтернативная позиция (Кастельс, 2016; Тоффлер, 2020; Белл, 2004), которой придерживается и автор настоящей статьи, состоит в том, что *цифровая революция является столь же крупным историческим событием, как и индустриальная*. Иными словами, она относится не к технологическим, а к **хозяйственным революциям**, поскольку порождает *новую социально-экономическую модель организации хозяйственной жизни*. Рыночная экономика, характерная для индустриального периода, постепенно уступает место сетевой.

Под *сетевой экономикой* понимается социально-экономическая модель организации хозяйственной жизни, в которой взаимодействие между экономическими агентами происходит преимущественно на основе прямых долгосрочных кооперационных и информационных связей, опосредованных отношениями доверия. В сетевой экономике ведущим полем взаимодействия становятся сети. В отличие от рынка, где взаимодействуют независимые акторы, связи между которыми осуществляются на основе разовых сделок, регулируемых взаимным влиянием спроса и предложения, а основой взаимодействия является конкуренция, сети основаны на долгосрочном сотрудничестве формально независимых

экономических агентов. Сети имеют сложившуюся внутреннюю конфигурацию, хотя далеко не всегда имеют четкие границы и подвержены реконфигурации. Ведущими трансакциями в сетях, наряду с трансакциями обмена (встречное перемещение благ), являются *трансакции взаимности* (симметричное перемещение) (Поланьи, 2002). Конкуренция перемещается в область конкуренции между сетями, а внутри самих сетей уступает место сотрудничеству (Полтерович, 2018).

Изучению сетевых отношений посвящено значительное число исследований (Портер, 2016; Gereffi, Humphrey, Sturgeon, 2005), в том числе российских ученых (Катькало, 1990; Шерешева, 2010; Радаев, 2008; Макаров, Попов, 2019). Однако бóльшая часть работ рассматривает сети как новый феномен рыночной экономики. По нашему мнению, сети представляют собой *поле взаимодействия*, являющееся альтернативой как рынку, так и организации (Устюжанина, Дементьев, Евсюков, 2021).

Базовыми характеристиками сетевой модели экономики являются: развитая система разделения труда, прямые долгосрочные кооперационные и информационные связи между экономическими агентами, отношения доверия и взаимная зависимость. Распределение ресурсов происходит на основе неоклассических или отношенческих контрактов. Основными способами координации становятся совещательный и нормативный. Ценовая координация выступает в качестве вспомогательной меры.

На становление сетевой экономики решающее влияние оказали два фактора: 1) глобализация производства и рынков положила предел территориальной экспансии капитала; 2) цифровая революция расширила и облегчила возможности коммуникаций.

Нельзя не отметить, что различные формы сетевых отношений существовали в экономике всегда, начиная с общинной и заканчивая рыночной моделью экономики. Но капитализм — как эпоха предпринимательства и новаций — разрушал сложившиеся устойчивые связи, предлагая взамен новых контрагентов и новые рынки сбыта. Ведь лейтмотивом хозяйственной деятельности в условиях капитализма является поиск новых рынков, способных поглотить растущие мощности производства товаров и услуг. Однако глобализация имеет естественные географические пределы, которые, в конце концов, были достигнуты.

Необходимо отметить, что иерархические и рыночные формы взаимодействия возникли в ответ на неспособность сетевой формы обеспечить эффективное обслуживание системы разделения труда, когда оно стало выходить за рамки узкого круга лиц. Причина заключалась в ограниченных возможностях средств коммуникаций и систем обмена информацией. Но сами по себе и рыночный (ценовой), и иерархический (административный) способы координации далеко не всегда обеспечивают эффективную реализацию экономического потенциала общества (развернутую аргументацию причин этого явления можно найти в (Дементьев, 1998)). Развитие ИКТ позволяет решить проблему обмена информацией, а следовательно, и установления прямых связей и отношений доверия между широким кругом лиц (Паринов, 2002).

В табл. 4 представлены базовые характеристики социально-экономических моделей организации хозяйственной деятельности.

К сожалению, в настоящее время не представляется возможным дать научно обоснованный ответ на вопрос, какие способы производства зарождаются на базе сетевой экономики. Однако уже сейчас очевидно, что происходит существенная *трансформация базовых институтов* рыночной экономики.

Таблица 4. Базовые характеристики социально-экономических моделей

Базовые характеристики	Общинная	Сословная	Рыночная	Сетевая
Ведущая сфера деятельности	Сельское хозяйство	Сельское хозяйство, война, ремесло	Промышленность	ИКТ
Характер труда	Простой ручной	Квалифицированный ручной	Машинный	Компьютерный
Основной тип хозяйственного взаимодействия	Взаимность	Подчинение	Конкуренция	Кооперация
Ведущий способ координации	Совещательный	Иерархический	Ценовой	Совещательный

Источник: разработано автором.

ТРАНСФОРМАЦИЯ БАЗОВЫХ ИНСТИТУТОВ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ

Трансформация института стоимости

В рыночной экономике цена определяется взаимодействием спроса и предложения. При этом спрос на товар формируется под влиянием множества факторов, важнейшим из которых является соотношение полезности блага и его цены. А обстоятельствами, которые решающим образом воздействуют на предложение товара, выступают физические возможности его создания (доступные ресурсы и технологии) и соотношение цены товара с затратами на его производство.

Таким образом, главные параметры, влияющие на процесс ценообразования,— соотношение цены товара с его полезностью и затратами на производство. При этом действуют два закона, определяющих изменение цены товара по мере увеличения его количества. Согласно закону убывающей предельной полезности, чем больше товара имеется в наличии (потребляется), тем ниже становится его предельная полезность. Как известно, в рыночной экономике функция совокупного спроса как сумма функций индивидуального спроса является убывающей. Обычно это трактуют как зависимость размера спроса от значения цены товара: чем ниже цена, тем больше величина спроса. Но верно и обратное утверждение: чем больше доступное количество блага, тем ниже его предельная полезность, а следовательно, и цена.

Одновременно, чем больше товара выпускается, тем менее качественными и/или более дорогими становятся ресурсы, вовлекаемые в его производство. В долгосрочном периоде, когда изменяется объем всех используемых факторов производства, происходит возрастание общих затрат, связанное с необходимостью использовать менее качественные ресурсы, прежде всего сложно воспроизводимые (природные и трудовые).

Иными словами, верхним пределом цены блага является его полезность, которая уменьшается с ростом объемов выпуска (потребления), а нижним — затраты, которые увеличиваются по мере роста объемов производства и вовлечения в него все менее качественных и/или более дорогих ресурсов. По сути в долгосрочном периоде цена уравновешивает не просто спрос и предложение. Она балансирует общественно-необходимые затраты на производство товара с общественной полезностью производимого продукта. И именно эту точку равновесия можно считать стоимостью.

В сетевой экономике появляется феномен *сетевых благ*, обладающих двусторонними сетевыми эффектами, что существенным образом изменяет саму логику ценообразования.

Первый сетевой эффект (эффект масштаба потребительной ценности) связан с переходом от индивидуального к сетевому потреблению и, как следствие, с возрастанием ценности блага для потребителей по мере увеличения общего объема его использования (Goolsbee, Klenow, 2000). Потребление сетевых благ эффективно только при наличии некоторой массы пользователей, образующих связанную сеть. При этом связи могут быть как непосредственными (связи пользователей друг с другом), так и опосредованными (совместное пользование теми или иными ресурсами, в том числе на базе транзакционных цифровых платформ).

Второй сетевой эффект (эффект масштаба производства) связан со структурой затрат на производство и распространение сетевых благ. Имеется в виду не только высокая доля постоянных издержек при относительно низких переменных затратах на непосредственное производство (тиражирование) таких благ (Shapiro, Varian, 1999). Огромную часть общих затрат составляют инвестиционные затраты производителя, что требует значительных объемов выпуска финальной продукции для достижения уровня окупаемости капитальных вложений (Дементьев, Евсюков, Устюжанина, 2018). Наиболее явно данная особенность проявляется для цифровых благ. Речь идет как о *собственно цифровых продуктах*, в том числе программах, текстовых, аудио- и видеофайлах, так и об услугах транзакционных цифровых платформ. При этом предельные затраты на выпуск (предоставление) каждой дополнительной единицы продукции ничтожно малы: «Цифровые продукты копируются и передаются по каналам связи практически без затрат... Копирование в традиционном смысле становится клонированием...» (Козырев, 2018, с. 9).

Таким образом, сетевые эффекты опровергают оба закона рыночного ценообразования: и закон уменьшающейся предельной полезности, и закон возрастающих предельных издержек. По мере увеличения количества произведенных (потребленных) сетевых благ их ценность для потребителей возрастает, в то время как средние и предельные издержки производителя (поставщика) снижаются. Следовательно, в отличие от индустриальных благ полезность и затраты на производство сетевых благ движутся в разных направлениях. А это означает, что точки равновесия (сходимости полезности и затрат) не существует как таковой и затратный способ ценообразования теряет смысл.

Трансформация института экономической власти

Под экономической властью будем понимать способность одних экономических агентов односторонне влиять на поведение других агентов (Дементьев, Устюжанина, 2016). Экономическая власть позволяет осуществлять контроль над хозяйственной деятельностью агентов, навязывать им свои цели, распоряжаться ресурсами и произведенной продукцией, перераспределять в свою пользу экономический излишек.

Система власти любого общества включает динамическое переплетение множества различных источников: «Власть, подобно энергии, должна быть рассмотрена как постоянно превращающаяся из любой одной из своих форм в любую другую» (Russell, 2000, p. 10). Различные основания власти поддерживают и дополняют друг друга (Дементьев, 2012). Однако в каждую эпоху можно выделить специфичный именно для данного способа производства *базис экономической власти*.

Как уже отмечалось, в сословно-иерархической экономической системе источником экономической власти, а вместе с ней и права на экономический излишек, являлась не столько собственность на ресурсы, сколько положение в общественной иерархии. При этом правомочия собственника основного ресурса — земли — были существенно ограничены и часто исключали право распоряжения; они зависели от социального статуса (сословные права) и/или были распределены между многими лицами.

При капитализме частная собственность становится наиболее полной и приобретает черты абсолютного права. Общество разделяется на владельцев капитала и лишенных средств производства наемных работников, вынужденных продавать свою способность к труду. Право на экономический излишек становится производным от права на капитал. Форма получения экономического излишка может быть различной — предпринимательская прибыль, процент или рента, но главным является связь между собственностью на фактор производства и правом на факторный доход.

Конечно, и в рыночной экономике собственность не является единственным источником экономической власти. Имеют место и такие источники доминирования, как различная переговорная сила сторон (наличие оснований для вымогательства), барьеры входа на тот или иной рынок, законодательные ограничения и преференции, монополия. Однако при капитализме именно *собственность* является ведущим базисом экономической власти.

Столь существенная роль собственности в капиталистической экономике провоцирует некоторых исследователей приписывать сложившиеся при капитализме отношения власти другим эпохам. Прежде всего это проявляется применительно к докапиталистическим экономическим системам, когда преувеличивается значение собственности на землю и практически игнорируются вопросы внеэкономического принуждения и сословных привилегий. Аналогичную позицию занимают ученые, которые ищут основной объект собственности в сетевой (цифровой) экономике. И находят его в информации, внимании и других нематериальных субстанциях. На самом деле, чтобы понять основания власти в сетевых отношениях, нужно отказаться от узкой трактовки власти-собственности и попробовать исследовать те *возможности навязывать свою волю другим лицам*, которые складываются именно в сетевой экономике.

Для анализа этого явления нам необходимо выявить ведущие основания зависимости в сетевых отношениях. К этим основаниям можно отнести: 1) контроль доминирующего участника над входом на рынок; 2) социальный капитал (связи) доминирующего участника; 3) владение уникальными знаниями и компетенциями; 4) контроль над редкими ресурсами; 5) естественная монополия (монопсония); 6) возможность обеспечивать эффект масштаба; 7) возможность выполнять функции связующего звена; 8) фундаментальная трансформация, связанная с вложениями участников сети в специфические активы.

Первые пять оснований можно отнести к общим источникам доминирования, характерным и для рыночной экономики, основания 6–8 приобретают значимость именно в сетевых отношениях.

Значимое преимущество, которое обеспечивает возможность масштабирования, уже обсуждалось ранее при анализе проблем ценообразования на сетевые блага. Производители или посредники, в частности транзакционные цифровые платформы, одновременно повышают ценность своей продукции (услуг) для потребителей (эффект масштаба потребительной ценности) и снижают удельные издержки (эффект масштаба производства). Именно поэтому к ключевым конкурентным

преимуществам платформ, помимо умения привлечь внимание, удобства навигации и качества фильтров относят *возможность масштабирования*.

Но эффект масштаба характерен не только для сетевых, но и для обычных благ. Как правило, он проявляется на олигополистических рынках. Поставщики, которые имеют дело с олигополистом, будь то производственная компания, сетевой ритейлер или цифровая платформа, кардинально увеличивают объемы сбыта и одновременно существенно экономят транзакционные издержки.

Выполнение функций связующего звена, как правило, прерогатива интегратора сетей. Интегратор заполняет пустоты отношений и существенно снижает транзакционные издержки других участников. Одновременно происходит атрофия важнейших рыночных компетенций компаний-сателлитов. Они теряют навыки устанавливать новые отношения с новыми контрагентами и, соответственно, оказываются запертыми в сложившейся системе связей.

Но самое главное и имманентное именно сетям основание власти связано с возникновением специфического *сетевого капитала участников* (Устюжанина, Евсюков, Комарова, 2019), тем, что Оливер Уильямсон называл *фундаментальной трансформацией* (Уильямсон, 1996).

Напомним, что специфическим называется актив, ценность которого в существующих условиях его применения много выше, чем при других вариантах использования, включая продажу. Соответственно, инвестируя средства в приобретение или создание *специфического актива*, участник сети оказывается запертым в существующие отношения, поскольку выход из них грозит ему потерей сделанных инвестиций. Иными словами, основания власти переворачиваются с ног на голову: если в каноническом варианте инвестиции выступают источником власти-собственности, то в ситуации фундаментальной трансформации сделанные вложения становятся причиной *подчиненного положения инвестора*.

При этом сами по себе специфические активы участников сетевых структур разнообразны. Наряду с вложениями в приобретение узкоспециализированного оборудования, инвестициями в исследования и разработки, а также в отработку специальных технологий, к специфическому сетевому капиталу можно отнести и специфичность сложившихся внутри сети межфирменных норм взаимодействия, и специфичность управленческих практик, и специфичность отношенческих компетенций. Во все эти виды материальных и нематериальных активов вкладываются значительные средства и время, которые будут потеряны при выходе из сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Есть основания утверждать, что происходящая на наших глазах цифровая трансформация хозяйственной деятельности представляет собой не очередной технологический этап промышленной революции, а хозяйственную революцию такого же масштаба. Эта революция порождает новую модель экономической системы — сетевую экономику, важнейшими чертами которой являются прямые долгосрочные кооперационные и информационные связи между экономическими агентами, основанные на отношениях доверия и взаимозависимости.

Сетевые отношения зарождаются в рамках рыночной системы, подобно тому как когда-то рыночные отношения зарождались в рамках сословно-иерархической модели экономики. Новый тип организации производства (цифровая экономика) и распределения (сетевая экономика) связан с существенными трансформациями базовых институтов рыночной экономики — стоимости, собственности и власти. На основе проведенного нами исследования можно сделать вывод, что изменения данных институтов имеют кардинальный характер — изменяются основы экономической модели, так как перестают действовать имманентные рыночной экономике законы ценообразования, распределения экономического излишка и контроля над хозяйственной деятельностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Белл Д. (2004). Грядущее постиндустриальное общество. Опыт социального прогнозирования. Москва: Академия. 788 с. [**Bell D.** (2004). *The coming of post-industrial society. A venture in social forecasting.* Moscow: Academia. 788 p. (in Russian).]

Васильев Л.С. (2011). Эволюция общества. Типы общества и их трансформация. Москва: КДУ. 206 с. [**Vasiliev L.S.** (2011). *The evolution of society. Types of society and their transformation*. Moscow: KDU. 206 p. (in Russian).]

Веблен Т. (2007). Теория делового предприятия. М.: Дело. 288 с. [**Veblen T.** (2007). The theory of business enterprise. Moscow: Delo. 288 p. (in Russian).]

Веблен Т. (2016). Теория праздного класса. Экономическая мысль Запада. Для науч. б-к. М.: Либроком, 366 с. [**Veblen T.** (2016). The theory of the leisure class. Moscow: Librokom. 366 p. (in Russian).]

Дементьев В.В. (2012). Институты, поведение, власть. Донецк: Донецкий национальный технический университет. 310 с. [**Dementiev V.V.** (2012). *Institutions, behavior, power*. Donetsk: Donetsk National Technical University. 310 p. (in Russian).]

Дементьев В.Е., Евсюков С.Г., Устюжанина Е.В. (2017). Гибридные формы организации бизнеса: к вопросу об анализе межфирменных взаимодействий // *Российский журнал менеджмента*. Т. 15. № 1. С. 89–122. [**Dementiev V.E., Evsukov S.G., Ustyuzhanina E.V.** (2017). Hybrid forms of business organization: The Interfirm cooperation perspective. *Russian Management Journal,* 1, 89–122 (in Russian).]

Дементьев В.Е., Евсюков С.Г., Устюжанина Е.В. (2018). Модель ценообразования на рынке сетевых благ в условиях дуополистической конкуренции // *Экономика и математические методы*. Т. 54. № 1. С. 26–42. [**Dementiev V.E., Evsukov S.G., Ustyuzhanina E.V.** (2018). Pricing model in the market of network goods in the conditions of duopolistic competition. *Economics and Mathematical Methods*, 54, 1, 26–42 (in Russian).]

Дементьев В.Е., Устюжанина Е.В. (2016). Проблема власти с точки зрения институционального подхода // *Журнал институциональных исследований*. Т. 8. № 3. С. 91–101. [**Dementiev V.E., Ustyuzhanina E.V.** (2016). The problem of power from the point of view of an institutional approach. *Journal of Institutional Research*, 8, 3, 91–101 (in Russian).]

Дементьев В.Е. (1998). Интеграция предприятий и экономическое развитие. Препринт # WP/98/038. М.: ЦЭМИ РАН. 114 с. [**Dementiev V.E.** (1998). *Enterprise integration and economic Development*. Preprint # WP/98/038. Moscow: CEMI RAS. 114 p. (in Russian).]

Кастельс М. (2016). Информационная эпоха: экономика, общество и культура. Пер. с англ. под науч. ред. О.И. Шкаратана. М.: НИУ ВШЭ. 606 с. М.: ГУ ВШЭ. 608 с. [**Castells M.** (2016). *The information age: Economy, society and culture*. Moscow: HSE. 606 p. Original: Castells D.M. (1996). The rise of the network society (The information age volume I) and expanded to include Chapter I and the Conclusion from The end of millennium (The information age volume III) (in Russian).]

Катькало В.С. (1990). Межфирменные сети: проблематика исследований новой организационной стратегии в 1980–90-е годы // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Сер. 5. Вып. 2. № 12. Режим доступа: https://mognovse.ru/zge-ekonomika-zarubejnih-stran.html [**Katkalo V.S.** (1990). Inter-firm networks: Problems of research of a new organizational strategy in the 1980–90s. *Vestnik of the St. Petersburg University.* Ser. 5, 2, 12. Available at: https://mognovse.ru/zge-ekonomika-zarubejnih-stran.html (in Russian).]

Козырев А.Н. (2018). Цифровая трансформация рыночных институтов // *Цифровая экономика*. № 4. С. 5–23. [**Kozyrev A.N.** (2018). Digital transformation of market institutions. *Digital Economy*, 4, 5–23 (in Russian).]

Латов Ю.В. (2007). «Восточный деспотизм» К.А. Виттфогеля (к 50-летию «странной» книги) // *Историко-экономические исследования*. Т. 8. № 2. С. 8–37. [**Latov Yu.V.** (2007). "Eastern despotism" by K.A. Wittfogel (to the 50th anniversary of the "strange" book). *Historical and Economic Studies*, 8, 2, 8–37 (in Russian).]

Макаров В.Л. (2013). Экономика знаний: уроки для России // *Вестник Российской академии наук*. Т. 73. № 5. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomika-znaniy-uroki-dlya-rossii-rossii/viewer [**Makarov V.L.** (2013). Economy of knowledge: Lessons for Russia. *Herald_of the Russian Academy of Sciences*, 73, 5. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomika-znaniy-uroki-dlya-rossii-rossii/viewer (in Russian).]

Макаров В.Л., Попов Е.В. (2019). Сетевые экономические взаимодействия. М.: Юрайт. 167 с. [**Makarov V.L., Popov E.V.** (2019). *Network economic interactions*. Moscow: Yurayt. 167 p. (in Russian).]

Маркс К. (2020). Капитал. Т. 1. Пер. С. Алексеева. М.: Азбука. 512 с. [**Marks K.** (2020). Capital. Vol. 1. Translated from the English by C. Alekseev. Moscow: Azbuka. 512 p. (in Russian).]

Паринов С.И. (2002). К теории сетевой экономики. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН. 168 с. [**Parinov S.I.** (2002). *On the theory of networked economics*. Novosibirsk: Institute of Economics and Industrial Engineering of the Siberian Branch of the RAS. 168 p. (in Russian).]

Перес К. (2011). Технологические революции и финансовый капитал: Динамика пузырей и периодов процветания. М.: Дело. 232 с. [**Peres K.** (2011). *Technological revolutions and financial capital: Dynamics of bubbles and periods of prosperity*. Moscow: Delo. 232 p. (in Russian).]

Поланьи К. (2002). Экономика как институционально оформленный процесс // *Экономическая социология*. Т. 3. № 2. С. 62–73. [**Polanyi K.** (2002). Economy as an institutionalized process. *Economic Sociology*, 3, 2, 62–73 (in Russian).]

Полтерович В.М. (2018). Интернет, гражданская культура и эволюция механизмов координации // *Вестник ЦЭМИ*. № 1. Режим доступа: https://cemi.jes.su/s111111110000102–5–1/ [**Polterovich V.M.** (2018). The Internet, civil culture and the evolution of coordination mechanisms. *Bulletin of the CEMI*, 1. Available at: https://cemi.jes.su/s111111110000102–5–1/ (in Russian).]

Портер М. (2016). Международная конкуренция. Конкурентные преимущества стран. М.: Альпина Паблишер. 947 с. [**Porter M.** (2016). *International competition. Competitive advantages of countries*. Moscow: Alpina Publisher. 947 p. (in Russian).]

Радаев В.В. (2008). Рынок как переплетение социальных сетей // *Российский журнал менеджмента*. Т. 6. № 2. С. 47–54. [**Radaev V.V.** (2008). The market as an interweaving of social networks. *Russian Journal of Management*, 6, 2, 47–54 (in Russian).]

Роджерс Д.Л. (2018). Цифровая трансформация. М.: Издательская группа «Точка». 344 с. [**Rogers D.L.** (2018). *Digital transformation*. Moscow: Publishing group "Tochka". 344 p. (in Russian).]

Семенов Ю.И. (2008). Политарный («азиатский») способ производства: сущность и место в истории человечества и России. М.: Волшебный ключ. 401 с. [**Semenov Yu.I.** (2008). *The polytaric ("Asian") method of production: The essence and place in the history of mankind and Russia*. Moscow: Volshebnyi kljuch. 401 p. (in Russian).]

Тоффлер Э. (2020). Третья волна. М.: Smart Reading. 800 с. [**Toffler E.** (2020). *The third wave*. Moscow: Smart Reading. 800 p. (in Russian).]

Уильямсон О.И. (1996). Экономические институты капитализма. Фирмы, рынки, «отношенческая» контрактация. СПб.: Лениздат. 703 с. [**Williamson O.I.** (1996). *Economic institutions of capitalism. Firms, markets, "relational" contracting.* St. Petersburg: Lenizdat. 703 p. (in Russian).]

Устюжанина Е.В. (2006). Проблемы развития отношений собственности в современной российской экономике. М.: ГУУ. 287 с. [**Ustyuzhanina E.V.** (2006). *Problems of the development of property relations in the modern Russian economy*. Moscow: State University of Management (SUM). 287 p. (in Russian).]

Устюжанина Е.В., Дементьев В.Е., Евсюков С.Г. (2021). Транзакционные цифровые платформы: задача обеспечения эффективности // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 1. С. 5–18. [**Ustyuzhanina E.V., Dementiev V.E., Evsukov S.G.** (2021). Transactional digital platforms: The task of ensuring efficiency. *Economics and Mathematical Methods*, 57, 1, 5–18 (in Russian).]

Устюжанина Е.В., Евсюков С.Г., Комарова И.П. (2019). Сети создания стоимости: проблемы формирования и управления // *Менеджмент и бизнес-администрирование*. № 3. С. 132–150. [**Ustyuzhanina E.V., Evsukov S.G., Komarova I.P.** (2019). Value networks: Problems of formation and management. *Management and Business Administration*, 3, 132–150 (in Russian).]

Устюжанина Е.В., Сигарев А.В., Шеин Р.А. (2017). Цифровая экономика как новая парадигма экономического развития // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. Т. 13. № 10. С. 1788–1804. [**Ustyuzhanina E.V., Sigarev A.V., Shein R.A.** (2017). Digital economy as a new paradigm of economic development. *National Interests: Priorities and Security,* 13, 10, 1788–1804 (in Russian).]

Шваб К. (2016). Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо. 208 с. [**Schwab K.** (2016). The fourth industrial revolution. Moscow: Eksmo. 208 p. (in Russian).]

Шерешева М.Ю. (2010). Формы сетевого взаимодействия компаний: курс лекций — Москва: НИУ «Высшая школа экономики». 339 с. [**Sheresheva M.Yu.** (2010). Forms of network interaction of companies: A course of lectures. Moscow: NRU «Higher School of Economics», 339 p. (in Russian).]

Buera F.J., Kaboski J.P. (2009). The rise of the service. *NBER Working Paper No. w14822.* Available at: https://ssrn.com/abstract=1369058

Gereffi G., Humphrey J., Sturgeon T. (2005). The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*, 12 (1), 78–104.

Goolsbee A., Klenow P.J. (2000). Evidence on learning and network externalities in the diffusion of home computers. *NBER Working Paper*. No. W7329.

Machlup F. (1962). *The production and distribution of knowledge in the United States.* Princeton: Princeton University Press. 483 p.

Negroponte N. (1995). *Being digital. Knopf.* Paperback edition. Vintage Books. New York: Knopf. 252 p.

Russell B. (2000). *Power.* London, New York: Routledge. 207 p.

Shapiro C., Varian H. (1999). *Information rules: A strategic guide to the network economy*. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press. 352 p.

Tapscott D. (1995). *The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence*. New York: McGraw-Hill. 342 p.

Network economy as a socio-economic model

© 2022 E.V. Ustyuzhanina

E.V. Ustyuzhanina,
Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: dba-guu@yandex.ru

Received 02.09.2021

Abstract. The paper analyzes fundamental changes in the economy that take place nowadays as a result of digitalization and globalization of economic relations. The research hypothesis of the paper is a suggestion of the crucial role of transformation processes which can be compared to the Industrial Revolution. The research methods are: historical analysis, institutional analysis as well as systems analysis. The author tries to separate technological, economic and institutional dimensions of economic development. These dimensions center around such concepts as "type of the economy" (technological dimension), "socio-economic model" (economic dimension) and "mode of production" (institutional dimension). The author shows that the industrial type of economy corresponds to the market economic system that can develop under different modes of production — capitalism and etatism. Likewise, the digital type of economy corresponds to the network economic system, the basis features being division of labour, direct long-term cooperation and information links between economic agents, trust-based relationships and interdependence. Special emphasis is made on transformation of basic institutions of the market economy as well as transition to the network economy. The author shows that such basic laws of the market economy as pricing, distribution of economic surplus and control over economic activity are no longer valid.

Keywords: network economy, digital economy, digital revolution, type of economy, economy system, production way, institute of value, institute of power.

JEL Classification: A10, B41, D02.

Quoting: **Ustyuzhanina E.V.** (2022). Network economy as a socio-economic model. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 27–37. DOI: 10.31857/S042473880018967-2

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 38–47

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Структурные инерционности экономических систем

© 2022 г. Е.Л. Торопцев, А.С. Мараховский

Е.Л. Торопцев,
Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь; e-mail: eltoroptsev@yandex.ru

А.С. Мараховский,
Филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Пятигорск; e-mail: marahov@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.09.2021

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-010-00084А «Математическое моделирование структурной устойчивости и макроэкономической динамики»).

Аннотация. Системные инерционности образуют мультидисциплинарную область исследований, в которой пересекаются интересы естественнонаучных, технических, гуманитарных, социально-экономических и иных дисциплин. При анализе данного явления экономическая наука опиралась в основном на методы и положения экономической теории и философии. Глобальные свойства предмета затрудняли формализацию исследований, числовые оценки инерционностей ограничивались введением того или иного коэффициента в экономико-математическую модель. Вместе с тем, задел для получения числовых значений структурных инерционностей в координатах отраслей (видов экономической деятельности) естественным образом создает базовая динамическая модель межотраслевого баланса, записанная в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Входящая в нее матрица коэффициентов капиталоемкости невырождена и вполне может называться матрицей межотраслевых инерционностей, элементы которой имеют размерность времени. В работе описана методика исчисления указанной матрицы. Ее размерность равна размерности матрицы формирования выпуска товаров и услуг, публикуемой Росстатом. Заявленная методика представляет собой верифицируемую последовательность алгебраических преобразований в рамках методологии «затраты–выпуск». В работе приведены инерционности, связанные с процессами формирования основного капитала, а также инерционности создания валовой добавленной стоимости экономики России. Большое прикладное значение полученных результатов состоит в разработке и демонстрации экономико-математического аппарата для сопоставительного анализа структурных динамических свойств разных экономик при их моделировании в координатах одних и тех же отраслей.

Ключевые слова: инерционности экономических систем, динамический межотраслевой баланс, экономическая динамика, базовая матрица, матрицы промежуточного потребления и добавленных стоимостей, оцифровка модели.

Классификация JEL: B41, C02, C61, C68.

Цитирование: **Торопцев Е.Л., Мараховский А.С.** (2022). Структурные инерционности экономических систем // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 38–47. DOI: 10.31857/S042473880016564-9

1. ВВЕДЕНИЕ

Всякому проявлению экономической динамики присуще свойство инерционности. Адекватных знаний об экономических аспектах обсуждаемого в работе явления на сегодняшний день явно недостаточно, а имеющиеся сведения представлены вербально в большом числе источников. Примером тому могут служить работы (Сиднина, 2002, 2009). Множество смыслов, вкладываемых в понятие «*инерционность*», касается различных вариантов проявления устойчивости или изменчивости структур и динамики процессов в экономике и социальной сфере, чему посвящены исследования (Сиднина, 2002, 2009; Воеводина, 2001; Нельсон, Уинтер, 2002; Полтерович, 2007; Агеева, Спахов, Юшкова, 2018), а также иностранных авторов (Narula, Jormanainen, 2008; Narula, 2002). Исследований, опубликованных после 2018 г., нам обнаружить не удалось, за исключением тезисов

в сборниках трудов научных конференций. Исключение здесь представляет глава из монографии (Różycki, 2019).

Общим для перечисленных работ являются: «постановка проблемы», «рассмотрение сущности явления», «выявление особенностей». При этом элементы анализа инерционности в социально-экономических системах математическими методами не уходят дальше описания этих систем некими (не уточняется, какими именно) функциями с последующим построением матрицы Якоби с участием этих функций и переменных, от которых они зависят (Павлов, Самохин, 2007). Есть предложения моделировать инерционности соответствующими эластичностями. На этом математика исследования проблемы исчерпывается. Косвенным образом она затрагивается в работах (Аглицкий, Клейнер, Сирота, 2018; Баранова, Сорокин, 2017; Любушин, Бабичева, Конышков, 2017; Виленский, Лившиц, Смоляк, 2015; Любушин и др., 2015). В этих работах речь идет об устойчивости и устойчивом развитии экономики, человеческом капитале, инвестициях, инвестиционной деятельности, а это — сугубо инерционные категории.

Итак, большинство форм проявления экономической жизни инерционны. Функционирование контура управления экономикой также в полной мере обладает этим свойством. Последнее часто, порой во вред планируемому и возможному для достижения результату, оправдывается необходимостью взвешенного подхода, получения обоснованного, выверенного управленческого решения или действий по правилу «семь раз отмерь». При этом другое правило, согласно которому «кто выигрывает время, тот выигрывает все», остается в стороне.

Инерционность как явление рассматривается в микро- (Нельсон, Уинтер, 2002), макро- и институциональной экономиках (Полтерович, 2007). Безусловно, инерционность присутствует также в процессах целенаправленного преобразования институтов и формирования институциональных ловушек, реформирования рынков, трансформационных спадов и восстановительных релаксаций с последующими подъемами, называемыми периодами экономического роста. Множество публикаций, в которых обсуждаются варианты проявления анализируемого свойства в экономических системах, относятся к периоду от середины 1990-х до начала 2000-х годов[1]. Знакомясь с этими работами, можно прочитать о некой «вязкости» структуры производственных и институциональных систем, производительных сил и производственных отношений, принятия разноуровневых управленческих решений. Этим свойством обладает наука и мышление, переходные процессы различаются по качеству и интенсивности, а виды экономической деятельности и рынок труда имеют различные чувствительности ко всем управляющим воздействиям — от инвестиционных до административных.

Как мы видим, обсуждаемое понятие имеет чрезвычайно много аспектов. С его проявлениями некоторые авторы связывают и генерацию циклов деловой активности (см., например, (Агеева, Спахов, Юшкова, 2018)), и временные параметры смены технологических укладов (Глазьев, 2016), и вообще все процессы, имеющие динамику. При этом в зависимости от содержательной постановки задачи делается вывод о полезности бóльших или меньших инерционностей (Воеводина, 2001). В качестве примера отметим, что экономике желательно обладать демпферными свойствами в отношении циклов деловой активности, а также в отношении рецессий, экономических кризисов и спадов (Журавский, 2005, 2019; Афонасова, 2016), а их проявления в деятельности предприятий (например, торговли) следует минимизировать (Шишкин и др., 2012). И если речь идет о росте национальной экономики, то хочется стать свидетелями и творцами его устойчивого, магистрального темпа в соответствии с экспоненциальным законом и со всеми пропорциями, отражаемыми в теории и методологии «затраты–выпуск» (Широв, 2018). В последнем случае меньшие собственные (внутриотраслевые) инерционности свидетельствуют о более высокой чувствительности экономики к управляющим, прежде всего инвестиционным, воздействиям.

Анализ приведенных публикаций позволяет заметить, что проблема экономико-математического моделирования предмета нашего исследования в экономических системах анализировалась, но решений найдено не было. Исключения составляют работы (Воеводина, 2001; Рудакова, 2001), где содержатся указания на необходимость включения в макроэкономическую модель числовой оценки инерционности в виде соответствующего параметра или коэффициента. И если у (Воеводина, 2001) это число позволяет поставить знак равенства (вместо знака пропорциональности) в некой формуле, то у (Рудакова, 2001) предложен более сложный подход: сформирована числовая оценка, зависящая от многих компонент. Однако не стоит уповать на высокую информативность одного-единственного числа, записанного в отношении сложной и многомерной экономики, даже

[1] Перечень таких работ приведен в списке литературы в (Сиднина, 2002).

если его конкретное значение зависит от многих переменных и параметров модели или факторов реальной экономической жизни.

Теоретики-классики экономики и смежных наук обнаруживают сущности различных явлений, вводят и раскрывают категории и понятия, устанавливают разные системные свойства, в том числе анализируют формы проявления инерционности в экономике и социальной сфере (Berns, Metchell, 1946; Blanchard, Fisher, 1989). Однако наиболее продуктивный, на наш взгляд, подход в проблеме основан на обращении к леонтьевской методологии и моделям «затраты–выпуск».

Инерционности (мы переходим к множественному числу этого термина) характеризуют свойства структуры экономики, а модель межотраслевого баланса (МОБ) — как раз структурная. Более того, количественная оценка этих явлений дает представление о структурной экономической *динамике*, а это значит, что нам надо использовать *динамические* модели МОБ.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИНЕРЦИОННОСТЕЙ

До настоящего времени серьезные числовые оценки инерционностей были недоступны исследователям. Мы попытаемся начать решать эту проблему. Адекватная поставленной проблеме модель появилась в (Leontief et al., 1953), когда динамическая теория «затраты–выпуск» стала внедряться в практику исследования экономики США. Позже В.В. Леонтьев включил модель в свои «Экономические эссе» (Леонтьев, 1990), записав ее в виде

$$BpX(t)+AX(t)+Y(t)=X(t),\ \ X(0)=X_0, \tag{1}$$

где использованы традиционные леонтьевские обозначения из (Леонтьев, 1990). Рассмотрение современного состояния проблемы отраслевой классификации в России и за рубежом выполнено в (Козырь, Коваленко, 2017). Особое внимание в модели (1) привлекает матрица B — матрица приростных фондоемкостей (у Леонтьева — capital coefficients, коэффициентов капиталоемкости). В «Экономико-математическом словаре» Л.И. Лопатникова читаем: «Если провести физическую аналогию, этот показатель как бы играет роль массы, характеризующей инерцию экономической системы». Таким образом, матрицу B модели (1) логично и закономерно назвать матрицей инерционностей формирования основного капитала. Другое проявление свойства инерционностей рассмотрено ниже.

Матрица B — объект уникальный. Нет такой страны, которая бы в своей статистической отчетности опубликовала эту матрицу, и это имеет свои объяснения. Во времена действия классификатора ОКОНХ считалось, что матрица B вырождена на том основании, что числовое наполнение могут иметь только строки, соответствующие фондообразующим отраслям. Такими отраслями были строительство и машиностроение (или две группы отраслей в детализированных балансовых схемах). Указанный факт становился известным исследователям еще со студенческой скамьи и потом уже не подвергался сомнению. Аксиома о вырожденности B многие десятки лет отбивала охоту заниматься моделью (1), которая была отнесена к чисто теоретическим конструкциям (Суворов, Трещина, Белецкий, 2017). Вместе с тем, вырожденность B языком математики показывает, что модель (1) представляет собой систему, состоящую как из дифференциальных, так и из алгебраических уравнений. Последнее означает, что вектор выпуска $X(t)$ состоит из интегрируемых и неинтегрируемых переменных. Первые не могут меняться скачком, т.е. обладают инерционностями. Вторые могут изменяться внезапно, т.е. являются безынерционными. Последние трудно представить в условиях реальной экономики, где отраслевые выпуски товаров и услуг в условиях мирного времени скачкообразно не меняются, а межотраслевые инерционности присутствуют. Матрица B может иметь нулевые элементы, но вырожденной быть не может. Внезапно могут измениться, например, экономические отношения, формы мотивации экономической активности, институты и механизмы принятия решений, цены конечных потребителей, ставки, курсы, тарифы и прочие атрибуты функционирования отраслей, не отражаемые в модели (1).

Наши ранние попытки оцифровки модели (1) наталкивались на постоянное появление в B множества отрицательных элементов, что не имеет смысла в нормально функционирующей экономике. Наше название и вложенный выше в матрицу B смысл обусловлены тем, что приростные фондоемкости безразмерны, а инерционности имеют размерность времени, что привело к успеху проверки модели (1), как минимум, по размерности. Переходный процесс для модели (1) определяется интегрированием соответствующей матричной экспоненты $\exp(B^{-1}(E-A-L))t$ после приведения модели

к нормальной форме Коши. Здесь E — единичная матрица; L — матрица, возникающая в (1) при установлении линейной связи между выпуском и конечным спросом $Y(t) = LX(t)$ (Торопцев, Мараховский, Дужински, 2020). Исчерпывающие выводы о качестве переходных процессов, о собственных (внутренних, структурных) динамических свойствах (СДС) экономики теоретически были бы доступны на основе анализа собственных значений и собственных векторов матрицы состояния (1): $G = (B^{-1}(E - A - L))$. Ее элементы имеют размерность частоты (1/год). Как известно, собственные значения и векторы этой матрицы однозначно определяют структурную динамику. Точные суждения о полных межотраслевых инерционностях, формируемых всеми массивами модели, можно было бы высказывать на основе анализа элементов матрицы $G^{-1} = (E - A - L)^{-1} B$. Ее элементы имеют размерность времени и в данном случае измеряются в годах. Матрицы B (как и G^{-1}) для различных экономик можно было бы сравнивать между собой с целью сопоставительного анализа их динамических свойств.

Почему в вышесказанном присутствует частица «бы», означающая, как известно, предположительную возможность? Ответ на этот вопрос выглядит следующим образом. Уравнения динамического МОБ можно записать как по строкам баланса, так и по столбцам, как это делают в случае составления ценовой модели МОБ. В последнем случае получим модель с некоторой матрицей $\hat{B}$ перед производными, которая будет характеризовать динамику процесса создания валовой добавленной стоимости (ВДС), тогда как B из (1) отображает динамику образования основного капитала отраслей. Таким образом, это — две разные матрицы инерционностей. Если ВДС представляет разницу между валовым выпуском и промежуточным потреблением, то

$$\hat{B}pX + A^T X(t) = X(t), \;\; X(0) = X_0. \tag{2}$$

Наши многолетние попытки получить (вычислить/синтезировать) неотрицательные B и $\hat{B}$ увенчались успехом только в (Торопцев, Мараховский, Дужински, 2020). До этого среди элементов данных матриц неминуемо присутствовало доминирующее множество отрицательных. Мы не были одиноки в своих неудачах, чем объясняется тотальное отсутствие обсуждаемых матриц в научных и статистических изданиях, а Росстат никогда не ставил задачи их разработки. Это стало возможным благодаря предложению А.С. Мараховского ввести в модель (1) так называемую базовую матрицу BM (basic matrix), на которую умножается вектор валового производства таким образом, что при получении матрицы состояния G на месте единичной матрицы оказывается базовая. Базовая матрица представляет собой такой математический объект, который обладает тем свойством, что умножение его на вектор X возвращает тот же вектор X. Иными словами, вектор выпуска является собственным вектором базовой матрицы, которому соответствует единичное собственное значение, поэтому $BM \times X = X$.

С базовой матрицей и неотрицательными инерционностями b_{ij} исследуемую здесь модель можно включить в состав ведущих в области макроэкономики модельных комплексов типа RIM (Широв, Янтовский, 2017).

3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Перейдем теперь к обоснованию и анализу вычислительных экспериментов.

Расчеты выполнялись на основе статистики за 2011 г. из периодически издаваемого Росстатом сборника[2]. Этот год был выбран, потому что:

— наши расчеты не требуют новейшей статистики, да и структура экономики за последующие 10 лет не претерпела радикальных трансформаций;

— в это время уже сошло на нет влияние мирового кризиса 2008–2009 гг., а эпоха экономического давления и санкций еще не наступила;

— год был относительно спокойным в отношении функционирования экономики и возможностей ее развития и роста.

«Национальные счета России» предоставляют нам для расчетов матрицы формирования выпуска товаров и услуг на пятилетнем интервале. В наших обозначениях это — PM (production matrix). Шапка таблицы и левый столбец содержат перечисления разделов ОКВЭД-2, нижняя строка и правый столбец представляют валовые выпуски. При этом первая содержит суммы элементов столбцов

[2] Национальные счета России в 2011–2016 гг. https://www.gks.ru/free_doc/doc_2017/nac/NAC_Ch_2017.pdf).

таблицы и дает представление о денежных суммах в разрезе ВЭД, выступающих в качестве оценки товаров и услуг для продажи и потребления, а второй (содержит суммы элементов строк) информирует о материальных результатах процессов производства продукции и услуг. Суммы элементов указанных строки и столбца равны и отражены в числе, стоящем в правом нижнем углу таблицы — как в схеме МОБ. Величины же соответствующих разным ВЭД элементов строки и столбца хотя и сопоставимы друг с другом, но в целом различны. Сказанное дает основание для различия *произведенного* и *использованного* выпуска. Аналогично различают произведенный и использованный ВВП. Обозначим их теперь X_{prod} и X_{used} соответственно. Это позволяет так записать теперь модели (1) и (2):

$$BpX_{used}(t)+AX_{used}(t)+Y(t)=X_{used}(t),\ X_{used}(0)=X_{0,used}, \tag{3}$$

$$BpX_{prod}+A^{T}X_{prod}(t)=X_{prod}(t),\ X_{prod}(0)=X_{0,prod}. \tag{4}$$

Первоначально рассмотрим уравнение (4), записанное по схеме МОБ «сверху вниз». Для этого случая Росстат публикует вектор промежуточного потребления, обозначим его *ICV* (intermediate consumption vector), а также вектор добавленных стоимостей *VAV* (value added vector). Справедливо равенство

$$X_{prod}=ICV+VAV. \tag{5}$$

Векторы, входящие в (5), являются свертками матриц промежуточного потребления (*MIC,* matrix of intermediate consumption) и добавленных стоимостей (*MVA,* matrix of value added). Векторы из (5) задают необходимые пропорции для генерации последних матриц при естественном выполнении равенства

$$PM^{\mathrm{T}}=MIC+MVA. \tag{6}$$

Переход от (5) к (6) задается формулой

$$PM^{\mathrm{T}}=\mathrm{diag}\left(\left(PM^{T}\right)^{-1}ICV\right)PM^{\mathrm{T}}+\mathrm{diag}\left(\left(PM^{T}\right)^{-1}VAV\right)PM^{\mathrm{T}}, \tag{7}$$

из которой очевидны матрицы правой части (6), построенные на основе пропорций, заданных векторами из (5). Элементарные алгебраические приемы показывают верность (7).

Выражения (5) и (6) также связывает формула

$$PM^{\mathrm{T}}\,\mathrm{diag}\left(1/X_{prod}\right)X_{prod}=MIC\,\mathrm{diag}\left(1/X_{prod}\right)X_{prod}+MVA\,\mathrm{diag}\left(1/X_{prod}\right)X_{prod}, \tag{8}$$

где $\mathrm{diag}(1/X_{prod})=\mathrm{diag}\{1/x_{prod,i}\}_{i=1}^{n}$ является диагональной матрицей, а $X_{prod}=\{x_{prod,i}\}_{i=1}^{n}$ — столбцом. Уравнение (8) позволяет перейти от финансовых потоков к удельным затратам и приводит к статической ценовой модели МОБ, в чем нетрудно убедиться. Во-первых, умножение матрицы на вектор с единичными элементами суммирует ее строки, что сразу дает (5). Во-вторых, и это для нас — самое ценное, умножение базовой матрицы $BM=PM^{\mathrm{T}}\,\mathrm{diag}(1/X_{prod})$ на вектор X_{prod} дает тот же вектор. Если *PM* — матрица формирования выпуска товаров и услуг, то *BM* — матрица коэффициентов формирования выпуска товаров и услуг. Но наше название «базовая матрица» короче и подчеркивает фундаментальную роль введенного объекта. В-третьих, справедливы записанные на основе (8) уравнения:

$$\begin{gathered}BM\times X_{prod}=A^{\mathrm{T}}\times X_{prod}+MVA'\times X_{prod},\ \ MVA'=MVA\times\mathrm{diag}\left(1/X_{prod}\right),\\ X_{prod}=BM^{-1}\times A^{\mathrm{T}}\times X_{prod}+BM^{-1}\times MVA'\times X_{prod},\\ X_{prod}=A^{\mathrm{T}}\times X_{prod}+VAV,\ —\end{gathered} \tag{9}$$

где последнее уравнение представляет собой ценовой МОБ в узнаваемом виде. Таким образом, в (9) нами идентифицирована матрица коэффициентов прямых производственных затрат из основного уравнения МОБ (1). Динамизм же процесса создания добавленной стоимости может быть учтен, если нижнее уравнение из (9) записывать для соседних периодов *t* и использовать получаемые отсюда разностные уравнения или прямо использовать для моделирования дифференциальное уравнение (4).

При этом для анализа структурных переходных процессов оно записывается в нормальной форме Коши:

$$pX_{prod}(t)=B^{-1}\left(BM-A^{\mathrm{T}}\right)X_{prod}(t)=GX_{prod}(t),\quad X_{prod}(0)=X_{0,prod}. \tag{10}$$

В уравнении (10) вместо единичной применена базовая матрица. При этом качественное приближение матрицы состояния *G* можно определить на основе анализа динамики валового производства, которую предоставляет Росстат, для чего выполняются следующие действия.

На основе анализа указанной динамики за несколько лет задаем приближение матрицы состояния модели. Так, если в номинальном денежном выражении динамика была экспоненциальной, то, например, считаем, что

$$G = \mathrm{diag}\left\{\lambda_i\right\}_{i=1}^{n}; \quad \lambda_i = \ln\left(x_{i,2018} / x_{i,2011}\right) / \left(2018 - 2011\right) \tag{11}$$

на интервале 2011–2018 гг. Если в каких-либо ВЭД наблюдаются околотрендовые колебания различной природы, то среди собственных значений G появляются комплексно-сопряженные пары $\lambda_{j,j+1} = \alpha_j \pm i\omega_j, \quad i = \sqrt{-1}$. Тогда формула (11) модифицируется, а избежать работы с комплексной арифметикой можно за счет организации в матрице G блочно-диагональных клеток второго порядка вида

$$G = \begin{pmatrix} \alpha_i & -\omega_i \\ \omega_i & \alpha_i \end{pmatrix}. \tag{12}$$

Как правило, этого достаточно, но при необходимости отобразить более сложные процессы, вызывающие образование кратных комплексных пар собственных значений, матрица G на диагонали будет содержать Жордановы клетки соответствующего размера. Однако это — маловероятный для экономики случай.

Естественно, что заданное изначально матрицей PM диагональное доминирование сохраняется и в базовой матрице. Базовая матрица, обладающая чудесным свойством $X = BM \times X$, позволила использовать модель (1) для исследований структуры реальной экономики и уверенно расположить ее во множестве вычислимых. Формула (7) позволяет вычислить матрицы промежуточного потребления (промежуточных затрат) MIC и добавленной стоимости MVA. Из (8) следуют матрицы коэффициентов прямых производственных затрат A и матрицы коэффициентов формирования добавленной стоимости MVA' из первого уравнения в (9). При этом несложно заметить, что $BM = A^{\mathrm{T}} + MVA'$.

Оцифровка модели будет завершена, если по данным валового производства будет определено приближение матрицы состояния G из 20 диагональных элементов. Если рассматривать динамику валового производства по данным Росстата на принятом интервале, то

$$G = \mathrm{diag}\begin{Bmatrix} 0{,}085; 0{,}125; 0{,}096; 0{,}058; 0{,}099; 0{,}066; 0{,}065; 0{,}102; 0{,}094; 0{,}089; \\ 0{,}100;, 0{,}074; 0{,}093; 0{,}131; 0{,}084; 0{,}070; 0{,}093; 0{,}125; 0{,}123; 0{,}081 \end{Bmatrix}. \tag{13}$$

Последние данные позволяют вычислить $\hat{B}$ из уравнения (10):

$$\hat{B} = \left(BM - A^{\mathrm{T}}\right) \times G^{-1}. \tag{14}$$

Расчеты по формуле (14) содержит рис. 1.

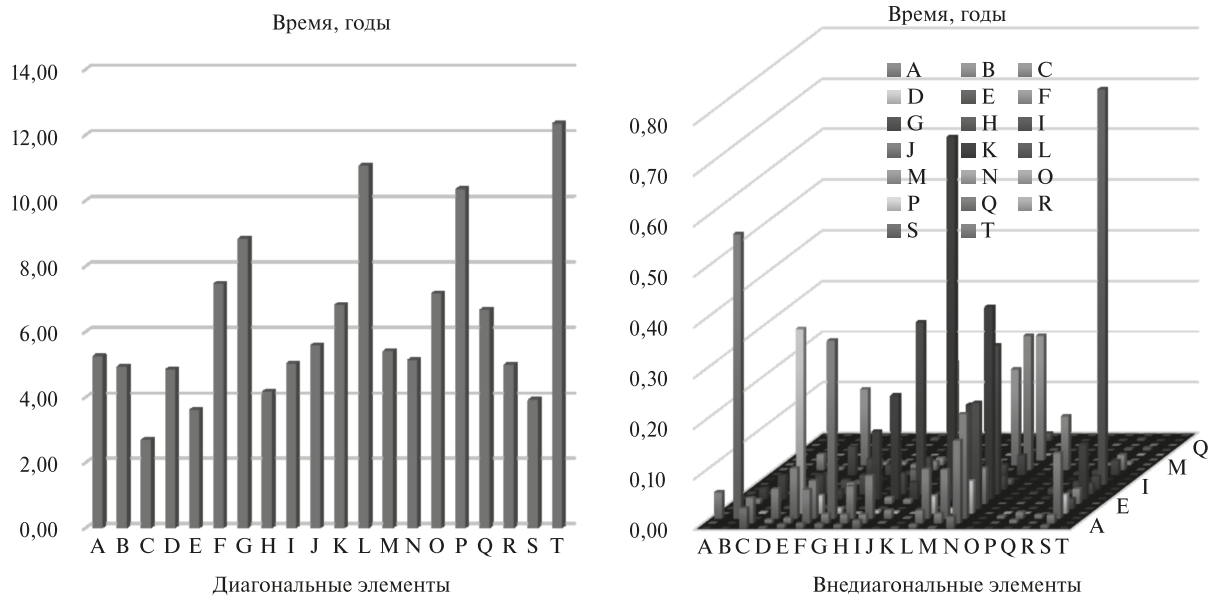


Рис. 1. Диагональные и внедиагональные элементы матрицы инерционностей формирования добавленной стоимости

Источник: расчеты авторов.

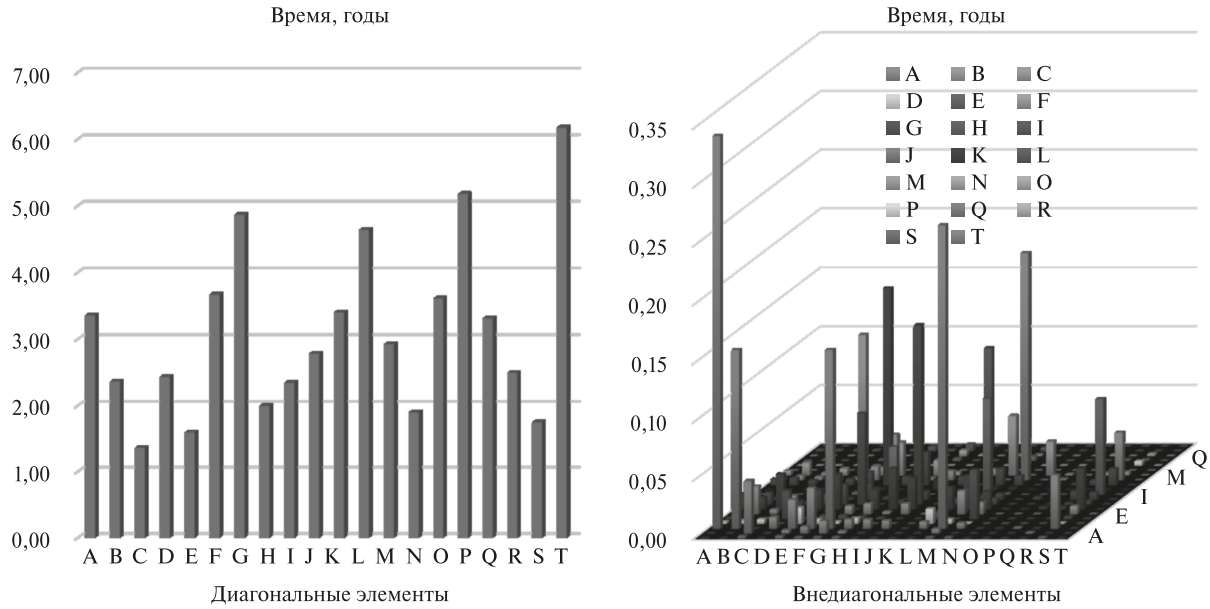


Рис. 2. Диагональные и внедиагональные элементы матрицы инерционностей формирования основного капитала

Источник: авторские расчеты.

Таким образом, расчетным путем удается определить все массивы для оцифровки моделей (1) и (2), а именно базовые матрицы, матрицы промежуточного потребления и добавленных стоимостей, а также межотраслевых инерционностей. Последние матрицы — это то, чего так недоставало для получения работоспособных и практически значимых версий динамических моделей МОБ В.В. Леонтьева. Теперь они есть! Во-первых, получен метод численного анализа межотраслевых инерционностей, представляющий самостоятельную ценность для науки и практики моделирования экономики. Это принципиально новый подход к проблеме численного анализа инерционностей. А во-вторых, на основе моделей Леонтьева возможно как прогнозирование (минимум среднесрочное) отраслевых выпусков путем решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений, так и решение широкого круга задач, направленных на анализ и обеспечение устойчивости функционирования экономики, оптимизации и управления структурными динамическими свойствами экономических систем, разработки сценарных вариантов экономической политики, прежде всего инвестиционной. Лучше всего решать их в составе больших систем моделирования типа RIM. Модели (1) и (2) совокупно с таблицами использования товаров и услуг и предложенным нами аппаратом анализа СДС предоставляют инструментарий для оценки тесноты межотраслевых связей, исследования простоты или сложности структуры отечественной экономики, а при наличии статистики — экономики любого региона или страны.

Матрицу инерционностей формирования основного капитала B, входящую в модель (1), также можно рассчитать по формуле

$$B = \left(BM - A - L\right)G^{-1}, \tag{15}$$

очевидно следующей из проведенного нами анализа. На рис. 2 приведен результат расчета по формуле (15) матрицы B. Конечно, большое влияние на результат вычислений оказывает матрица L, характеризующая потребление в секторе правительства, в домашних хозяйствах, а также учитывающая экспортно-импортное сальдо.

Для примера, представленного на рис. 2, мы предположили, что на указанное потребление расходуется половина ВДС. Понятно, что не следует брать данные для L случайным образом — нужны обоснованные предположения, а лучше — официальная статистика. Мы не располагали ни первым, ни вторым. Вместе с тем, случайный выбор L не меняет сделанные в работе выводы относительно деталей оцифровки динамических МОБ и о предназначении дифференциальных уравнений в задачах исследования существующей и синтеза желаемой экономической динамики.

Отметим, что помимо открывающихся новых возможностей в сфере анализа исследуемой экономики, а также для сопоставления динамических свойств разных экономик, новое качество и формализованное решение обретает проблема оценки влияния инвестиционных воздействий (масштабных инвестиционных проектов) на экономический рост и структурную устойчивость, что станет предметом наших дальнейших исследований. Очевидно, что связность, а значит, и устойчивость экономики растет по мере уменьшения столь сильных различий между величинами собственных (расположенных на диагонали матрицы B) и взаимных (представляемых внедиагональными элементами B) инерционностей отраслей. При этом ее чувствительность к управляющим воздействиям повышается с уменьшением абсолютных величин всех инерционностей. Последнее, в свою очередь, поддерживает рост требований к качеству, профессионализму физических лиц из структур, образующих контур управления экономикой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Агеева О.Ю., Спахов С.В., Юшкова В.Э. (2018). Инерционность экономических систем как фактор цикличности экономики // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. № 3 (58). С. 231–237. DOI: 10.17238/issn2071–2243.2018.3.231 [**Ageeva O. Yu., Spakhov S.V., Yushkova V.E.** (2018). Rigidities of economic systems as a factor of boom-and-bust economy. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University,* 3 (58), 231–237. DOI: 10.17238/issn2071–2243.2018.3.231 (in Russian).]

Аглицкий И.С., Клейнер Г.Б., Сирота Е.Н. (2018). Системный анализ инвестиционной деятельности. М.: Прометей. [**Aglitskii I.S., Kleiner G.B., Sirota E.N.** (2018). *System analysis of investment activity*. Moscow: Prometei (in Russian).]

Афонасова М.А. (2016). К вопросу о механизмах преодоления инерции экономического спада // *Фундаментальные исследования*. № 9–2. С. 316–320. [**Afonasova M.A.** (2016). On the question of mechanisms for overcoming the inertia of the economic downturn. *Fundamental Research,* 9–2, 316–320 (in Russian).]

Баранова Н.М., Сорокин Л.В. (2017). Влияние человеческого капитала на устойчивое развитие экономики // *Экономический анализ: теория и практика*. Т. 16. Вып. 12. С. 2224–2237. DOI: 10.24891/ni.13.9.1641 [**Baranova N.M., Sorokin L.V.** (2017). The impact of human capital on the sustainable development of the economy. *Economic Analysis: Theory and Practice,* 16, 12, 2224–2237. DOI: 10.24891/ni.13.9.1641 (in Russian).]

Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. (2015). Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика. М.: ПолиПринт Сервис. [**Vilenskii P.L., Livshits V.N., Smolyak S.A.** (2015). *Evaluation of the effectiveness of investment projects: Theory and practice*. Moscow: PoliPrint Servis (in Russian).]

Воеводина Н.В. (2001). Инерционность национальной экономики: фундаментальная база исследования. Уссурийск: ДВГУ. [**Voevodina N.V.** (2001). *Inertia of the national economy: The fundamental basis of research*. Ussuriisk: DVGU (in Russian).]

Глазьев С.Ю. (2016). Прикладные результаты теории мирохозяйственных укладов // *Экономика и математические методы*. Т. 52. № 3. С. 3–21. [**Glaz'ev S. Yu.** (2016). Applied results in the theory of world economic structures. *Economics and Mathematical Methods,* 52, 3, 3–21 (in Russian).]

Журавский М.Ю. (2005). К вопросу о методологии исследования инвестиционной инерции // *Вестник ТГПУ*. Вып. 5 (49). С. 20–22. [**Zhuravsky M. Yu.** (2005). On the issue of the methodology of investment inertia research. *Vestnik TGPU,* 5 (49), 20–22 (in Russian).]

Журавский Ю.А. (2019). Экономическая инерция и ускорение в методологии экономической динамики // *Экономика и управление инновациями*. № 4 (11). С. 20–34. [**Zhuravsky Yu.A.** (2019). Economic inertia and acceleration in the methodology of economic dynamics. *Economics and Innovation Management*, 4 (11), 20–34 (in Russian).]

Козырь Н.С., Коваленко В.С. (2017). Метрика отраслевой классификации в Российской Федерации и за рубежом // *Экономический анализ: теория и практика*. Т. 16. № 10 (469). С. 1914–1927. DOI: 10.24891/ea.16.10.1914 [**Kozyr' N.S., Kovalenko V.S.** (2017). Performance Metrics of Industrial Classification in the Russian Federation and Abroad. *Economic Analysis: Theory and Practice,* 16, 10 (469), 1914–1927. DOI: 10.24891/ea.16.10.1914 (in Russian).]

Леонтьев В.В. (1990). Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика. М.: Политическая литература. [**Leontief V.V.** (1990). *Economic essays. Theories, research, facts and politics*. Moscow: Politicheskaya literature (in Russian).]

Любушин Н.П., Бабичева Н.Э., Конышков А.С. (2017). Устойчивое развитие: оценка, анализ, прогнозирование // *Экономический анализ: теория и практика*. Т. 16. Вып. 12. С. 2392–2406. DOI: 10.24891/ea.16.12.2392 [**Lyubushin N.P., Babicheva N.E., Konyshkov A.S.** (2017). Sustainable development: Evaluation, analysis, forecasting. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 16, 12, 2392–2406. DOI: 10.24891/ea.16.12.2392 (in Russian).]

Любушин Н.П., Бабичева Н.Э., Усачев Д.Г., Шустова М.Н. (2015). Генезис понятия «устойчивое развитие экономических систем различных иерархических уровней» // *Региональная экономика: теория и практика*.

№ 48. С. 2–14. [**Lyubushin N.P., Babicheva N.E., Usachev D.G., Shustova M.N.** (2015). Genesis of the concept of sustainable development of economic systems of various hierarchical levels. *Regional Economics: Theory and Practice,* 48, 2–14 (in Russian).]

Нельсон Р.Р., Уинтер С.Дж. (2002). Эволюционная теория экономических изменений. М.: Дело. [**Nelson R.R., Winter S.G.** (2002). The evolutionary theory of economic changes. Moscow: Delo (in Russian).]

Павлов К.В., Самохин А.С. (2007). Инерционность социально-экономических и экологических систем // *Вестник Челябинского государственного университета*. № 19. С. 45–53. [**Pavlov K.V., Samokhin A.S.** (2007). Inertia of socio-economic and ecological systems. *Chelyabinsk State University's Academic Journal,* 19, 45–53 (in Russian).]

Полтерович В.М. (2007). Элементы теории реформ. М.: Экономика. [**Polterovich V.M.** (2007). *Elements of the theory of refo*rms. Moscow: Ekonomika (in Russian).]

Рудакова И.Е. (2001). О применимости языка экономической теории и базовых экономических моделей для анализа российской экономики // *Вопросы экономики*. № 12. С. 32–45. [**Rudakova I.E.** (2001). On the applicability of the language of economic theory and basic economic models for the analysis of the Russian economy. *Voprosy Ekonomiki,* 12, 32–45 (in Russian).]

Сиднина В.Л. (2002). Формы проявления инерционностей в социально-экономической системе // *Вестник Оренбургского государственного университета*. № 2. С. 150–154. [**Sidnina V.L.** (2002). Forms of manifestation of inertia in the socio-economic system. *Orenburg State University,* 2, 150–154 (in Russian).]

Сиднина В.Л. (2009). Проявление инерционности в существовании российской экономической элиты // *Известия Саратовского университета. Сер. Экономика. Управление. Право.* Т. 9. Вып. 1. С. 11–15. [**Sidnina V.L.** (2009). The manifestation of inertia in the existence of the Russian economic elite. *Bulletin of the Saratov State University,* 9, 1, 11–15 (in Russian).]

Суворов Н.В., Трещина С.В., Белецкий Ю.В. (2017). Балансовые и факторные модели как инструмент анализа и прогнозирования структуры экономики. В сб.: *Научные труды // Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН*. М.: Макс-Пресс. Т. 15. С. 50–75. [**Suvorov N.V., Treshchina S.V., Beletskii Yu.V.** (2017). Balance and factor models as a tool for analyzing and forecasting the structure of the economy. In: *Nauchnye trudy: Institute of Economic Forecasting* RAS. Moscow: Maks-Press, 15, 50–75 (in Russian).]

Торопцев Е.Л., Мараховский А.С., Дужински Р.Р. (2020). Проблема оцифровки динамической модели межотраслевого баланса // *Экономический анализ: теория и практика*. Т. 19. № 5. С. 946–972. DOI: 10.24891/ea.19.5.946 [**Toroptsev E.L., Marakhovskii A.S., Duszynski R.R.** (2020). The problem of digitalization of the dynamic input-output model. *Economic Analysis: Theory and Practice,* 19, 5, 946–972. DOI: 10.24891/ea.19.5.946 (in Russian).]

Широв А.А. (2018). Трансформация структуры экономики: механизмы и управление. М.: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Макс-Пресс. [**Shirov A.A.** (2018). *Transformation of the structure of the economy: mechanisms and management*. Moscow: Institute of Economic Forecasting RAS, Maks-Press (in Russian).]

Широв А.А., Янтовский А.А. (2017). Межотраслевая макроэкономическая модель RIM — развитие инструментария в современных российских условиях // *Проблемы прогнозирования*. Т. 162. № 3. С. 3–19. [**Shirov A.A., Yantovskii A.A.** (2017). Intersectoral macroeconomic model of the RIM — the development of tools in modern Russian conditions. *Studies on Russian Economic Development,* 162, 3, 3–19 (in Russian).]

Шишкин В.В., Капустина И.В., Кудрявцева Г.В., Шишкин В.И. (2012). Инерционность торговых предприятий как свойство экономических функциональных систем // *Международный научный журнал*. № 3. С. 25–29. [**Shishkin V.V., Kapustina I.V., Kudryavtseva G.V., Shishkin V.I.** (2012). Inertia of commercial enterprises as a property of economic functional systems. *The International Scientific Journal*, 3, 25–29 (in Russian).]

Berns A., Metchell У. (1946). *Business cycles analysis*. Cambridge (MA), National Bureau of Economic Research, pp. 35–37.

Blanchard O., Fisher S. (1989). *Lectures on Macroeconomics*. Cambridge: Mass., HIT Press.

Leontief W., Chenry H.B., Clark P.G., Duesenberry J.S., Ferguson A.R., Grosse A.P., Grosse R.N., Holzman M., Isard W., Kistin H. (1953). *Studies in the structure of the American Economy.* Harvard Economic Research Project: Research Project on the Structure of the American Economy. New York: Oxford University Press.

Narula R. (2002). Innovation systems and 'inertion' in R&D location: Norwegian firms and the role of systematic lock-in. *Research Policy,* 31 (5), 795–816.

Narula R., Jormanainen I. (2008). *When a good science base is not enough to create competitive industries: Lock-in and inertia in Russian systems of innovation*. United Nations University — Maastricht Economic and social Research and training center on Innovation and Technology Keizer Karelplein. Maastricht, Netherlands.

Różycki M. (2019). *Inertia in assessing the possibilities of economic development: Limits in modelling economies*. DOI: 10.5772/intechopen.86351

Structural inertia of economic systems

© 2022 E.L. Toroptsev, A.S. Marakhovskiy

E.L. Toroptsev,
North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia; e-mail: eltoroptsev@yandex.ru

A.S. Marakhovskiy,
Branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Pjatigorsk, Russia; e-mail: marahov@yandex.ru

Received 13.09.2021

The article was prepared with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project 20-010-00084A "Mathematical modeling of stability and macroeconomic dynamics").

Abstract. Systemic inertia forms a transdisciplinary field of studies, which includes interests of natural sciences, technical studies, humanitarian studies, socio-economic studies, etc. Economic science mainly relied on the methods of economic theory and philosophy to analyze this phenomenon. The global character of this subject impeded the formalization of research. Numerical interpretations of inertia were limited to the introduction of a coefficient in economic and mathematical model. At the same time, the opportunity of getting numerical values of structural inertia in the industry coordinates was provided by basic dynamic input–output balance model, presented as a system of basic differential equations. This model's matrix of capital coefficients (according to V. Leontief) is non-singular and can be called the matrix of interindustry inertia. Its elements have time measurements. This research presents the methodology for calculating the matrix. Its measurements are equal to the measurements of the matrix of the goods' output formation and services published by ROSSTAT with two years interval. This methodology consists of verifiable sequence of algebraic transformations within the input–output methodology with the specified matrix. This research represents the inertia, related to the processes of basic stock formation, and the inertia of the formation of the gross value added of Russian economy. The high practical importance of the research consists in the development and demonstration of the economic and mathematical apparatus for comparative analysis of structural dynamic properties of different economies when they are modeled in the coordinates of the same industries.

Keywords: inertia of economic systems, dynamic input–output balance, economic dynamics, basic matrix, matrices of intermediate consumption, matrices of added values, digitization of the model.

JEL Classification: B41, C02, C61, C68.

Quoting: **Toroptsev E.L., Marakhovskiy A.S.** (2022). Structural inertia of economic systems. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 38–47. DOI: 10.31857/S042473880016564-9

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 48–60

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Феномен ликвидности: суть, критерии, свойства и влияние на рыночную и инвестиционную стоимость активов

© 2022 г. Ю.В. Козырь

Ю.В. Козырь,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: y_k65@mail.ru

Поступила в редакцию 02.11.2021

Аннотация. Статья посвящена исследованию феномена ликвидности с позиции экономико-математического подхода. Представлены существующие определения и критерии ликвидности и неликвидности. Проведен анализ свойств ликвидности. Особое внимание уделено таким транзакционным издержкам, как спред и временной фактор. Показано, что ликвидность не является имманентно присущей категорией актива — это производная нескольких факторов, свойственных как самому активу, так и его рыночному окружению. На основе анализа предложено микроэкономическое описание условия возникновения ликвидности, возможные методы и способы выявления уровня ликвидности, а также способы оценок издержек ликвидности. Дополнительно приведены методы оценок экономических выгод ликвидности и их вклада в стоимость однородных и различающихся активов. Для оценок индивидуальных выгод ликвидности введены понятия «уравнивающая ставка» и «компенсаторный эквивалент», интегрированные в дальнейшем в методологию оценки общей и дополнительной ликвидности, выражаемой в относительной или абсолютной (денежной) формах. Дана классификация видов ликвидности, ее сочетание с инвестиционной стоимостью ликвидного и неликвидного актива, а также пример сквозного расчета значений предложенных величин. В приложении приведены расчетные формулы для оценки издержек ликвидности. Данную методологию расчетов можно применять при оценке инвестиционной привлекательности активов, выборе вариантов их размещения в форме денежных средств, ценных бумаг или объектов недвижимости.

Ключевые слова: ликвидность, рыночная стоимость, инвестиционная стоимость, оценка, активы, объект оценки, экономическая выгода, скидка на пониженную ликвидность.

Классификация JEL: C58, D46, G31, G32, G33, M58.

Цитирование: **Козырь Ю.В.** (2022). Феномен ликвидности: суть, критерии, свойства и влияние на рыночную и инвестиционную стоимость активов *// Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 48–60. DOI: 10.31857/S042473880018961-6

ВВЕДЕНИЕ

Феномен ликвидности в контексте ее влияния на стоимость объектов оценки занимает особое положение и стоит особняком от остальных тем. С одной стороны, при оценке стоимости объектов часто можно встретить утверждения типа: «Этот товар очень ликвидный и быстро уйдет», «Этот объект неликвидный и необходимо сделать скидку к цене» или «Этот объект обладает невысокой ликвидностью, поэтому нужно предусмотреть премию на пониженную ликвидность в ставке дисконтирования/капитализации». С другой стороны, по мнению автора, природа ликвидности изучена недостаточно глубоко, она, следуя англоязычному наименованию *liquid* (жидкость) и «*liquidity*» (текучесть), как бы ускользает (утекает) при попытках ее рассмотреть. При изучении данной проблематики в большинстве источников (Денин, 2020, с. 14–22; Шарп и др., 1997, с. 321; Amihud, Mendelson, 1986, p. 223–250; Datar, Naik, 1998, p. 203–219; Longstaff, 1995, p. 1767–1774; Finnerty, 2012, p. 53–69) исследовались вопросы ликвидности, связанные прежде всего с фондовым рынком и рынком деривативов, акцентируя внимание на выявлении размера скидки на пониженную ликвидность. Поэтому возникает объективное стремление предпринять очередную попытку рассмотреть природу и общие свойства ликвидности, в том числе в контексте ее влияния на стоимость активов.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИКВИДНОСТИ

Существуют несколько определений ликвидности.

Определение 1. *Ликвидность* актива является мерой того, насколько легко и быстро его можно обратить в денежные средства или эквивалент денежных средств[1].

Определение 2. *Ликвидность* означает возможность для инвестора быстро и без существенных финансовых потерь продать свои активы (Шарп и др., 1997, с. 321).

Определение 3. *Ликвидность* (от лат. liquidus «жидкий, перетекающий») — свойство активов быть быстро проданными по цене, близкой к рыночной. Ликвидный — обращаемый в деньги. Бывают высоколиквидные, низколиквидные и неликвидные ценности (активы). Чем легче и быстрее можно обменять актив с учетом его полной стоимости, тем более ликвидным он является[2].

Сравнение этих определений показывает, что первое определение отличается от второго и третьего лишь тем, что в нем не упоминаются финансовые издержки реализации актива, в то время как во втором и третьем определении эти издержки перечислены. В дальнейшем будем исходить из понимания того, что издержки ликвидности представляют собой неотъемлемую часть феномена ликвидности.

2. КРИТЕРИИ ЛИКВИДНОСТИ

Примем несколько возможных критериев ликвидности, вытекающих из определений ликвидности.

Критерий 1 (К1). Гомогенные объекты (активы), которые больше продаются и покупаются (т.е. с которыми совершается больше сделок) в единицу времени, являются более ликвидными по сравнению с другими сравниваемыми объектами.

В математической форме данный критерий можно выразить следующим образом:

$$\frac{dQ_L}{dt} > \frac{dQ_{NL}}{dt}, \tag{1}$$

где Q_L — количество ликвидного актива (товара); Q_{NL} — количество неликвидного актива (товара); dQ_L — изменение объема отдельных единиц ликвидного актива в единицу времени; dQ_{NL} — изменение объема отдельных единиц неликвидного актива в единицу времени.

Критерий 2 (К2). Объекты, реализация которых требует меньше среднего времени экспозиции, являются более ликвидными.

Критерий 3 (К3). Объекты (активы), спред котировок[3] которых меньше, являются более ликвидными по сравнению с объектами (активами), спред котировок которых имеет большее значение.

Отметим, что К3 применяется только в отношении тех классов активов, которые в явной или неявной форме имеют ценовые спреды, сделки с которыми осуществляются на регулярной основе. Например, данный критерий применим в отношении ценных бумаг и активов, пользующихся массовым спросом, в то время как в отношении закрытых паевых инвестиционных фондов или уникальных объектов его применять нельзя.

Критерий 4 (К4). Объекты (товары, активы) могут рассматриваться в качестве ликвидных, если они способны продаваться на вторичном рынке.

Необходимое условие соответствия данному критерию — способность объекта сохранять свои потребительские свойства в течение сравнительно длительного срока. Соответственно, при прочих равных, более ликвидным считается объект, способный дольше сохранять свои потребительские свойства (неизменными или не ниже определенного приемлемого уровня). Необходимым и достаточным условием соответствия данному критерию является способность объекта сохранять свои потребительские свойства в течение сравнительно длительного срока и существование

---

[1] Международные стандарты оценки 2017. Саморегулируемая общероссийская общественная организация «Российское общество оценщиков», с. 145–168.

[2] См. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B8%D0%BA%D0%B2%D0%B8%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C

[3] Спред (spread) — разница (или размах). На бирже чаще всего спредом называют разницу между ценой продажи и покупки актива.

организованного вторичного рынка соответствующих товаров. Из всех рассмотренных выше критериев ликвидности К4 будет наименее сильным, он подходит только для товаров длительного пользования и не подходит для одноразовых товаров или товаров с коротким сроком жизни (средств гигиены, театральных билетов, скоропортящихся продуктов).

Критерий неликвидности (КНЛ). Существует такая минимальная доходность (R_{min}), что при обещанной доходности $R < R_{min}$ инвесторы перестают инвестировать в объекты с обещанной доходностью R. В результате этого объекты с обещанной доходностью R становятся неликвидными.

3. СЛЕДСТВИЯ ИЗ КРИТЕРИЕВ ЛИКВИДНОСТИ

В соответствии с К1 и К2 наличие повышенной ликвидности предоставляет обладателю ликвидного актива выигрыш во времени, который пропорционален ставке рыночной доходности:

$$\delta V_{12} = R\left(t_L - t_H\right)/T, \tag{2}$$

где δV_{12} — относительный выигрыш, измеряемый в соответствии с критериями ликвидности К1 и К2; T — период, к которому привязано измерение альтернативной доходности R; t_L — ожидаемое время реализации неликвидного (менее ликвидного) объекта (актива); t_H — ожидаемое время реализации ликвидного (более ликвидного) объекта (актива).

Оценка параметров t_L и t_H осуществляется путем анализа продаж аналогичных активов. Отметим, что применение выражения (2) для оценки экономической выгоды ликвидности в рамках К1 и К2 возможно лишь при наличии одного или нескольких условий:

– в период реализации сравниваемых объектов они перестают функционировать в нормальном режиме;

– в период реализации менее ликвидного объекта его собственники теряют возможности более выгодно использовать свой капитал;

– в период реализации сравниваемых объектов их собственники затрачивают свое время, отрываясь от иной деятельности.

В соответствии с К3 наличие повышенной ликвидности предоставляет обладателю ликвидного актива дополнительный выигрыш, который состоит в снижении риска потери части стоимости имущества (актива) при его реализации:

$$\delta V_3 = \Delta\delta spr, \tag{3}$$

где δV_3 — относительный выигрыш, измеряемый в соответствии с К3; $\Delta\delta spr$ — разница относительных спредов котировок на покупку и продажу сравниваемых высоко- и низколиквидного объектов (активов):

$$\Delta\delta spr = \delta spr_L - \delta spr_H = \frac{spr_L}{MV_L} - \frac{spr_H}{MV_H}, \tag{4}$$

где δspr_L — спред низколиквидного актива (сопоставимого менее ликвидного актива), измеряемый в относительном выражении; δspr_H — спред высоколиквидного актива (сопоставимого более ликвидного актива), измеряемый в относительном выражении; spr_L — спред низколиквидного актива (сопоставимого менее ликвидного актива), измеряемый в абсолютном выражении; spr_H — спред высоколиквидного актива (сопоставимого более ликвидного актива), измеряемый в абсолютном выражении; MV_L — рыночная стоимость низколиквидного объекта; MV_H — рыночная стоимость высоколиквидного сопоставимого объекта.

В соответствии с (3) временной фактор является априори включенным (учтенным) в разнице между спредами котировок более и менее ликвидного актива.

Таким образом, активным инвесторам, инвестирующим в несколько активов и принимающим решения о распределении вложений между несколькими объектами (активами) (т.е. приемлющим концепцию альтернативной доходности), при оценке выгод ликвидности имеет смысл ориентироваться на первые три критерия, в соответствии с которыми относительные выгоды ликвидности могут быть рассчитаны по формуле

$$\delta V_A = R\left(t_L - t_H\right)/T = \Delta\delta spr, \tag{5}$$

где δV_A — выгоды ликвидности для активных инвесторов, остальные обозначения соответствуют ранее принятым.

В (5) поставлен знак равенства между выгодами ликвидности, оцениваемыми по К1–К3. Это отражает точку зрения автора, в соответствии с которой в ситуациях, когда имеется возможность непосредственно оценивать выгоды ликвидности сразу на базе К1–К3, результаты оценок в условиях равновесного рынка не должны сильно различаться (хотя при нарушении рыночного равновесия в выражении (5) вместо второго знака равенства следует поставить лишь знак приблизительного равенства). Тем не менее следует четко различать (разграничивать) ситуации, когда спред включает временны́е издержки и когда их не включает: при включении временных издержек в состав спреда их не нужно учитывать отдельно (как в формуле (5)), а при невключении временны́х издержек в состав спреда (либо при наличии оснований для учета дополнительных временны́х издержек, отражающих отличие специфики конкретной сделки от условий рыночной сделки) необходим их дополнительный учет[4].

Отметим, что в случае включения в периметр рассмотрения объектов (активов), владение и содержание которых стоит дорого (например, недвижимость), в качестве альтернативных издержек собственник актива дополнительно несет бремя содержания и экономического обесценения (экономической амортизации) соответствующего актива за время ($t_L - t_H$). В таких случаях вместо (5) суммарные относительные выгоды ликвидности могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\delta V_A = \left(R + \frac{C}{MV} + \delta EA \right) \frac{t_L - t_H}{T} = \Delta\delta spr, \tag{6}$$

где C — расходы на содержание объекта за дополнительное время его экспозиции (эксплуатационные и налоговые расходы собственника объекта); MV — рыночная стоимость объекта; δEA — экономическая амортизация объекта за время его экспозиции, выраженная в относительной форме ($\delta EA = EA/MV$, где EA — экономическая амортизация, в денежном выражении).

В то же время пассивным инвесторам при оценке выгод ликвидности имеет смысл ориентироваться на КНЛ, в соответствии с которым относительные выгоды ликвидности могут быть рассчитаны по формуле

$$\delta V_{\Pi} = R_{min}, \tag{7}$$

где δV_{Π} — относительные выгоды ликвидности для пассивных инвесторов, R_{min} — минимальная обещанная (договорная) доходность, ниже которой пассивный инвестор откажется размещать свои средства на депозите или вкладывать их в иной надежный актив (государственные облигации).

Выражения (5)–(6) позволяют аналитически оценивать ожидаемое дополнительное время экспозиции низколиквидных объектов при известных остальных параметрах:

$$t_L = t_H + \left(\Delta\delta spr\, T \right) / R, \tag{8}$$

$$t_L = t_H + \Delta\delta spr\, T / \left(R + C / MV + \delta EA \right). \tag{9}$$

Если при определении статистических характеристик среднего срока экспозиции использовать только данные по объектам, по которым были зафиксированы сделки, то получается заниженная оценка (Lundgren, Huang, 2019). Авторы предлагают процедуры оценки, основанные на методологии, развиваемой в рамках теории выживаемости.

4. СВОЙСТВА ЛИКВИДНОСТИ

Ликвидность является вторичным свойством объекта (актива), т.е. производной от первичных (базовых) свойств/качеств объекта (актива) и внешнего рыночного окружения. В этом отношении экономическая категория «ликвидность» схожа с другой экономической категорией — «рыночная стоимость»: они обе зависят от первичных свойств объекта и состояния рынка. Эмпирически установлено, что ликвидность и цены реализации являются взаимозависимыми категориями (величинами), причем при прочих равных условиях в первом приближении ликвидность обратно пропорциональна ценам реализации объектов[5]:

$$dQ/dt \sim 1/P, \tag{10}$$

где P — цена реализации объекта.

---

[4] См. выражения для издержек ликвидности в Приложении.

[5] Здесь можно подискутировать о том, что есть товары (активы) с высокой и низкой эластичностью спроса по цене — автор с этим согласен. Однако это не опровергает утверждения, что при продаже двух одинаковых товаров с низкой эластичностью спроса по цене быстрее будет продан товар, цена реализации которого ниже.

Обратим внимание на разницу в нюансах интерпретации ликвидности: ее можно рассматривать как скорость реализации в единицах (штуках) товара или как скорость реализации в относительном объеме от имевшегося уровня. Поскольку данное утверждение не следует непосредственно из определений ликвидности, приведем объясняющий это положение пример. Пусть продаются два схожих вида товара, например шоколадные батончики «Юпитер» и «Сатурн», являющиеся взаимозаменяемыми. Если, допустим, было установлено, что где-то в одно и то же время было продано 4 батончика «Юпитера» (из 5 имевшихся) и 20 батончиков «Сатурна» (из 50 имевшихся), станет очевидным, что большинство покупателей предпочитали покупать батончики «Сатурн». Поэтому ликвидность товаров следует ассоциировать именно со скоростью реализации, измеряемой в товарных единицах (штуках), а не в относительном объеме.

Изучение свойств ликвидности приводит к выводу, что *возникновение ликвидности и ее уровень [уровень ликвидности]* определяется / зависит от *степени совпадения* цены реализации и качественных характеристик рассматриваемого объекта с ценами и качественными характеристиками спроса и предложения подобных объектов. При этом в качестве измеримых характеристик ликвидности могут служить: интенсивность продаж[6], среднее время экспозиции объектов[7], оборачиваемость объекта (товара, актива) или объем продаж в натуральном выражении[8]. Чем больше совпадают цены и качественные характеристики рассматриваемого (оцениваемого) объекта с ценами и качественными характеристиками спроса и предложения на сопоставимые объекты, тем меньше время экспозиции и выше оборачиваемость объектов на рынке, и наоборот. При расхождении цены реализации и качественных характеристик объекта с рынком время его экспозиции возрастает, а оборачиваемость снижается.

Данный вывод можно сформулировать несколько иначе: при наличии спроса на тип (категорию) рассматриваемых объектов *уровень ликвидности конкретного объекта определяется рангом его индекса «качество/цена» среди выставленных на продажу сопоставимых объектов*. При этом из рассмотрения должны исключаться объекты с неприемлемо низкими качественными характеристиками и объекты с неприемлемо высокими ценами предложений. Анализ уровня ликвидности объекта в соответствии с предложенной формулировкой позволяет сделать прогноз о том, какой из выставленных на продажу объектов будет реализован в первую очередь, а какой — в последнюю[9]. Однако для того чтобы сделать обоснованные предположения о том, насколько будет различаться время экспозиции объектов с различными рангами индексов «качество/цена», необходимо проанализировать структуру уровней располагаемых капиталов и доходов потенциальных покупателей, а также степень их предпочтения качества (что в практической плоскости довольно сложно).

Как следует из приведенного выше описания, ликвидность объекта зависит от качественных характеристик рассматриваемого объекта; цены реализации рассматриваемого объекта; объема предложения сопоставимых по назначению и качественным характеристикам объектов; цен предложений, сопоставимых по назначению и качественным характеристикам объектов; платежеспособного спроса на сопоставимые по назначению и качественным характеристикам объекты.

Поскольку свойства ликвидности определяются несколькими факторами, изучение этих свойств возможно на основе множественной регрессии либо на основе нескольких однофакторных зависимостей при фиксации значений остальных значимых параметров. В последнем случае, как следует из экономической теории, можно заметить, что время экспозиции объекта зависит от:

---

[6] Интенсивность продаж определяется как число продаж в единицу времени, соотнесенное с общим числом объектов, оставшихся непроданными к начальному моменту времени.

[7] Точнее — величина, обратная среднему времени экспозиции объектов.

[8] В отношении объема продаж в качестве измеримого показателя ликвидности необходимо сделать одно предостережение: возможно, данный показатель перестает действовать в периоды биржевых паник и резких изменений на рынке. Альтернативная точка зрения состоит в том, что в период биржевой паники резкое увеличение объема продаж свидетельствует как раз в пользу данного показателя (объема продаж), поскольку это происходит вследствие осознания участниками рынка значительного отклонения текущих биржевых цен от справедливого уровня цен.

[9] Конечно, при условии одинаковой информированности участников рынка о наличии выставленных на продажу объектах, их характеристиках и условий продажи.

– от цены предложения (при фиксации качественных характеристик объекта, спроса и предложения) имеет прямо пропорциональную зависимость; при этом снижение качественных характеристик (потребительских свойств) объекта и/или снижение спроса на сопоставимые объекты, либо повышение объема предложения сопоставимых объектов на рынке приводит к увеличению времени экспозиции, и наоборот, зависимость времени экспозиции объекта экспозиции, и наоборот;

– от качественных характеристик (при фиксации цены предложения, спроса и предложения) имеет обратно пропорциональную зависимость; при этом повышение цены предложения на объект, либо снижение спроса на подобные объекты, либо увеличение предложения на подобные объекты приводит к увеличению времени экспозиции объекта, и наоборот;

– от спроса на подобные объекты (при фиксации цены предложения, качественных характеристик и предложения) имеет обратно пропорциональную зависимость; при этом увеличение цены предложения объекта, снижение спроса на подобные объекты или увеличение предложений подобных объектов приводит к увеличению времени экспозиции объектов, и наоборот;

– от объема предложения сопоставимых объектов (при фиксации цены предложения, спроса и качественных характеристик) имеет прямо пропорциональную зависимость; при этом увеличение цены предложения объекта, снижение качественных характеристик объекта или снижения спроса на подобные объекты приводит к увеличению времени экспозиции объекта, и наоборот.

5. ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ АБСОЛЮТНЫХ И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ВЫГОД ЛИКВИДНОСТИ

Введем еще несколько определений.

Выгоды (вклад) ликвидности — дополнительная ценность актива (имущества, товара или услуги), обусловленная его повышенной по сравнению с другим (неликвидным, менее ликвидным) активом ликвидностью.

Рассмотрим взаимосвязь между стоимостями ликвидного и неликвидного активов. Предположим, что потребительские или инвестиционные характеристики этих активов близки и отличаются лишь степенью (уровнем) ликвидности и что полезные свойства ликвидности можно экстрагировать в отдельную гипотетическую субстанцию и, таким образом, иметь возможность добавлять или удалять ее (их) из состава объекта.

При этих предположениях стоимость ликвидного актива

$$V_{la} = V_{nla} + V_l, \tag{11}$$

где V_{la} — стоимость ликвидного актива; V_{nla} — стоимость неликвидного актива; V_l — ценность вклада ликвидности (выгоды ликвидности) в стоимость ликвидного актива.

Стоимость неликвидного актива

$$V_{nla} = V_{la} - V_l. \tag{12}$$

Ценность вклада ликвидности ликвидного актива

$$V_l = V_{la} - V_{nla}. \tag{13}$$

Потери отсутствия ликвидности неликвидного актива

$$V_{nl} = V_{nla} - V_{la}. \tag{14}$$

Из (13) и (14) следует:

$$V_{nl} = -V_l. \tag{15}$$

Рассмотрим подходы к оценке выгод ликвидности при сравнении различных классов объектов.

5.1. Оценка выгод ликвидности при сравнении однотипных объектов

Пусть имеются два аналогичных по свойствам объекта, различающиеся своей ликвидностью. Если стоимость более ликвидного объекта равна V_{HL}, а стоимость менее ликвидного объекта — V_{LL}, очевидно, что вклад ликвидности (V_{AL}) в стоимость более ликвидного объекта по определению будет равен

$$V_{AL} = V_{HL} - V_{LL}. \tag{16}$$

Если же сравниваются ликвидности двух партий товаров, которые за установленное время реализовывались по различным ценам и в различном объеме, вклад ликвидности (V_{AL}) в стоимость более ликвидной партии товаров составит

$$V_{AL} = P_{HL}N_{HL} - P_{LL}N_{LL}, \tag{17}$$

где P_{HL} — цена реализации единицы высоколиквидного товара; N_{HL} — число реализованных единиц высоколиквидного товара; P_{LL} — цена реализации единицы низколиквидного товара; N_{LL} — число реализованных единиц низколиквидного товара.

Если известны различия в степени (уровне) ликвидности объектов, то это прежде всего выражается в различии среднего времени реализации объектов:

$$t_{HL} < t_{LL}, \tag{18}$$

где t_{HL} — время реализации высоколиквидного объекта; t_{LL} — время реализации низколиквидного объекта.

Если допустить, что разноликвидные объекты реализовывались бы по *приблизительно единой среднерыночной цене* (равной V_m), но за различное время (t_{HL} и t_{LL}), то в этом случае вклад дополнительной ликвидности (V_{AL}) в стоимость более ликвидного объекта можно было бы оценить следующим образом:

$$V_{AL} = R_f V_m \left(t_{ll} - t_{hl}\right) / T, \tag{19}$$

где R_f — безрисковая ставка; T — размерность времени, к которому привязана безрисковая ставка и остальные параметры выражения.

Отметим, что в (19) параметр V_m не случайно назван «приблизительно единой среднерыночной ценой». Это означает, что для оценок стоимостей более и менее ликвидных объектов эту «приблизительно единую среднерыночную цену» следует скорректировать в большую или меньшую сторону, применив к ней премию за повышенную ликвидность или скидку за пониженную ликвидность:

$$V_{HL} = V_m + 0{,}5V_{AL}, \tag{20}$$

$$V_{LL} = V_m - 0{,}5V_{AL}. \tag{21}$$

Введем дополнительно показатели относительной ликвидности:

$$\delta V_{HL} = 1 + V_{AL}/(2V_m) = 1 + 0{,}5\delta V_{AL}, \tag{22}$$

$$\delta V_{LL} = 1 - V_{AL}/(2V_m) = 1 - 0{,}5\delta V_{AL}, \tag{23}$$

$$\delta V_{AL} = V_{AL}/V_m = R_f(t_{ll} - t_{hl})/T = \delta V_{HL} - \delta V_{LL}, \tag{24}$$

где δV_{HL} — относительная величина рыночной стоимости более ликвидного объекта; δV_{LL} — относительная величина рыночной стоимости менее ликвидного объекта; δV_{AL} — относительная величина рыночной стоимости дополнительной ликвидности более ликвидного объекта при сравнении с менее ликвидным объектом.

5.2. Оценка индивидуальных выгод ликвидности при сравнении инвестиционной стоимости денег и неденежных активов

Сравним теперь полезность активов, ликвидность которых принципиально различна. Сравним полезности не приносящих доход наличных денег и генерирующего доход неденежного актива, например облигаций. Введем понятия *функции полезности денежных средств* и *функции полезности неденежного актива* (облигаций):

$$W_C = 1 / L_C, \tag{25}$$

$$W_b = \left(1 + i_b\right) / L_b, \tag{26}$$

где W_c — функция полезности денежных средств; W_b — функция полезности неденежного актива (облигаций); L_c — издержки ликвидности денежных средств, доли единицы; L_b — издержки ликвидности облигаций, доли единицы; i_b — полная доходность облигаций (сумма купонной и дисконтной (курсовой) доходности), ставка процента, деленная на 100.

Формулы для расчета издержек ликвидности представлены в Приложении.

Примечание 1. Другим названием функции полезности здесь может служить термин «относительная инвестиционная стоимость».

Примечание 2. В качестве неденежного актива в выражении (26) и в других, представленных ниже, выражениях можно рассматривать большинство известных активов, например акции или недвижимость. В таких случаях в качестве параметра i_b для акций следует использовать альтернативную доходность инвестирования в сопоставимые акции (сумма дивидендной и курсовой доходности), а для недвижимости — альтернативную доходность инвестирования в сопоставимые объекты недвижимости (сумма арендной и курсовой доходности).

Пример. Предположим, расчеты по формулам (25) и (26) привели к следующим результатам для функций полезности денежных средств и облигаций: $W_b = 0{,}97$; $W_c = 0{,}99$. Пусть процентная ставка i_b по облигациям равна 8%. Обозначим издержки ликвидности облигаций через L_b, а издержки ликвидности денежных средств — через L_c. Тогда подстановка исходных данных в формулы (25) и (26) приведет к следующим выражениям: $W_b = 1{,}08 / L_b = 0{,}97$, $W_c = 1 / L_c = 0{,}99$. Поскольку $W_c > W_b$, в то время как числитель W_b на 8% превосходит числитель W_c, возникает вопрос, при какой процентной ставке по облигациям полезность владения облигациями будет равна полезности владения денежными средствами. Такой ставкой является *уравнивающая ставка* (*ER*) — ставка процента, уравнивающая полезность неденежного актива, обладающего нулевой доходностью, с полезностью денежных средств

$$ER = \left(L_b / L_c - 1\right). \tag{27}$$

Из условий примера найдем неявно заданные издержки ликвидности облигаций и денежных средств: $L_b = (1+i_b)/W_b = 1{,}08/0{,}97 = 1{,}113$; $L_c = 1/W_c = 1/0{,}99 = 1{,}01$. Соответственно, используя выражение (27), определяем значение уравнивающей ставки $ER = 1{,}113/1{,}01-1 = 0{,}102$ (10,2%). Это означает, что до тех пор, пока процентная ставка по облигациям будет ниже уравнивающей ставки ($ER = 10{,}2\%$), конвертировать денежные средства в облигации на существующих условиях представляется нецелесообразным.

Для оценки минимального рыночного значения уравнивающей ставки следует использовать хорошо известное в макроэкономике понятие «ликвидная ловушка». Ликвидная ловушка отражает такое положение в экономике, при котором процентная ставка настолько низкая, что предпочтение ликвидности у домашних хозяйств становится абсолютным. По сути, в приведенных выше обозначениях эта ставка соответствует доходности R_{min} (см. критерий КНЛ).

В принятых выше обозначениях надо найти такое значение процента (*ER*), ниже которого конкретные финансовые инструменты инвестирования с такой доходностью (облигации, депозиты и др.) станут не интересными для потенциальных инвесторов и они предпочтут хранить свои средства в наличной форме. Банкирам, думается, хорошо известны такие уровни ставок. А при отсутствии такой информации можно попытаться провести аналитический расчет по формуле (27).

Введем теперь понятие «компенсационный эквивалент».

Компенсационный (компенсаторный) эквивалент денежных средств (*CEQ*) представляет собой процентную ставку, нивелирующую разрыв в полезности обладания денежными средствами и неденежным активом эквивалентной рыночной стоимости с ненулевой доходностью (i_b). Иными словами, от этого процента инвестор готов отказаться ради получения большей ликвидности, которую предоставляют денежные средства:

$$CEQ = \left(L_b / L_c - 1\right) - i_b. \tag{28}$$

Для условий нашего примера из (28) определяем значение компенсационного эквивалента: $1{,}113/1{,}01-1-0{,}08 = 0{,}022$ (2,2%). Это означает, что для целесообразности конвертации денежных средств в облигации с такими спредовыми издержками и такой доходностью (8%) доходность облигаций должна быть повышена минимум на величину компенсаторного эквивалента ($CEQ = ER - i_b = 2{,}2\%$). При несоблюдении данного условия (т.е. до тех пор, пока процентная ставка по облигациям будет ниже уравнивающей ставки) конвертировать денежные средства в облигации на существующих условиях представляется нецелесообразным.

5.4. Относительная инвестиционная стоимость[10] общей ликвидности денежных средств: определение и способ расчета

Относительная инвестиционная стоимость *общей* ликвидности денежных средств ($TLRV_c$) — это бóльшая инвестиционная стоимость единицы денежных средств по сравнению с инвестиционной

[10] В соответствии с Международным стандартом оценки 104, «Базы оценки»: «Инвестиционная стоимость — это стоимость актива для конкретного владельца или потенциального владельца с учетом их индивидуальных инвестиционных или операционных целей».

стоимостью единицы (гипотетического) неденежного актива, обладающего нулевой доходностью (с учетом различий в издержках ликвидности).

Относительная инвестиционная стоимость *общей* ликвидности денежных средств с средств, обладающих издержками ликвидности L_c определяется в сравнении с активом, обладающим издержками ликвидности L_b и нулевой доходностью ($i_b = 0$), и равна разнице между относительной инвестиционной стоимостью денежных средств ($1/L_c$) и относительной инвестиционной стоимостью неденежного актива ($1/ L_b$):

$$TLRV_c = L_c^{-1} - L_b^{-1}, \tag{29}$$

где $TLRV_c$ — относительная инвестиционная стоимость общей ликвидности денежных средств (см. пример расчета в конце статьи).

Для получения стоимости *общей* ликвидности, выраженной *в абсолютной форме*, необходимо умножить ее относительную стоимость на сумму денежных средств (или, что эквивалентно,— на рыночную стоимость неденежного актива):

$$TLAV_c = TLRV_c\, S, \tag{30}$$

где $TLAV_c$ — абсолютная инвестиционная стоимость общей ликвидности денежных средств; S — сумма денежных средств, эквивалентная рыночной стоимости неденежного актива, обладающего пониженной (по сравнению с денежными средствами) ликвидностью (см. пример расчета в конце статьи).

Суть формул (29)–(30) можно выразить так: инвестиционная стоимость общей ликвидности равна инвестиционной стоимости ликвидного актива минус инвестиционная стоимость неликвидного актива эквивалентной рыночной стоимости, обладающего нулевой доходностью.

5.5. Относительная инвестиционная стоимость дополнительной ликвидности денежных средств

Относительная инвестиционная стоимость *дополнительной* ликвидности денежных средств (*ALRVc*) — это бóльшая инвестиционная стоимость единицы денежных средств по сравнению с инвестиционной стоимостью единицы неденежного актива, имеющего ненулевую доходность (с учетом различий в издержках ликвидности).

Для денежных средств с издержками ликвидности L_c значение *ALRVc* определяется при сравнении с активом, имеющим издержки ликвидности L_b и доходность i_b, и равна разнице относительных инвестиционных стоимостей денежных средств и неденежного актива эквивалентной рыночной стоимости (или численно равна компенсационному эквиваленту денежных средств (*CEQ*), деленному на издержки ликвидности неденежного актива (L_b)):

$$ALRV_c = \frac{1}{L_c} - \frac{1+i_b}{L_b} = \frac{CEQ}{L_b}, \tag{31}$$

где $ALRV_c$ — относительная инвестиционная стоимость дополнительной ликвидности денежных средств (см. пример расчета в конце статьи).

Абсолютная инвестиционная стоимость *дополнительной* ликвидности денежных средств, обладающих издержками ликвидности L_c, определяется в сравнении с активом, имеющим одинаковую (с денежными средствами) рыночную стоимость (*MV*), издержки ликвидности L_b и доходность i_b, и численно равна их произведению ее относительной стоимости на рыночную стоимость сравниваемых величин (т.е. на размер денежных средств или на рыночную стоимость неденежного актива, которая по определению равна величине денежных средств):

$$ALAV_c = ALRV_c\, MV, \tag{32}$$

где $ALAV_c$ — абсолютная инвестиционная стоимость дополнительной ликвидности денежных средств (см. пример расчета в конце статьи).

Суть формул (31) и (32) можно выразить так: инвестиционная стоимость *дополнительной* ликвидности равна инвестиционной стоимости ликвидного актива минус инвестиционная стоимость неликвидного актива эквивалентной рыночной стоимости с (ненулевой) доходностью i_b.

В свете данных выше определений дополним теперь выражения (11)–(15) следующими равенствами. Инвестиционная стоимость ликвидного актива:

$$V_{la}(MV, L_c) = V_{nla}(MV, L_b, i_b) + ALV_c = V_{nla}(MV, L_b, i_b = 0) + TLV_c, \tag{33}$$

где $V_{la}(MV, L_c)$ — абсолютная или относительная инвестиционная стоимость ликвидного актива рыночной стоимостью MV[11], издержками ликвидности L_c; $V_{nla}(MV, L_b, i_b)$ — абсолютная или относительная инвестиционная стоимость неликвидного актива рыночной стоимостью MV, издержками ликвидности L_b, генерирующего доходность i_b; ALV_c — абсолютная ($ALAV_c$) или относительная ($ALRV_c$) инвестиционная стоимость дополнительной ликвидности денежных средств; TLV_c — абсолютная ($TLAV_c$) или относительная ($TLRV_c$) инвестиционная стоимость общей ликвидности денежных средств.

Инвестиционная стоимость неликвидного актива, генерирующего доходность i_b:

$$V_{nla}(MV, L_b, i_b) = V_{la}(MV, L_c) - ALV_c, \tag{34}$$

где $V_{nla}(MV, L_b, i_b)$ — абсолютная или относительная инвестиционная стоимость неликвидного актива рыночной стоимостью MV, издержками ликвидности L_b, генерирующего доходность i_b; $V_{la}(MV, L_c)$ — абсолютная или относительная инвестиционная стоимость ликвидного актива (денежных средств) рыночной стоимостью MV, издержками ликвидности L_c; ALV_c — абсолютная ($ALAV_c$) или относительная ($ALRV_c$) инвестиционная стоимость дополнительной ликвидности денежных средств. Выбор абсолютной или относительной форм стоимостей дополнительной ликвидности должен совпадать с формой выбора стоимостей для двух других членов этой формулы.

Инвестиционная стоимость неликвидного актива с нулевой доходностью:

$$V_{nla}(MV, L_b, i_b = 0) = V_{la}(MV, L_c) - TLV_c, \tag{35}$$

где $V_{nla}(\mathrm{MV}, L_b, i_b = 0)$ — абсолютная или относительная инвестиционная стоимость неликвидного актива с рыночной стоимостью MV, издержками ликвидности L_b, генерирующего нулевую доходность; TLV_c — абсолютная ($TLAV_c$) или относительная ($TLRV_c$) инвестиционная стоимость общей ликвидности денежных средств. Выбор абсолютной или относительной форм стоимостей общей ликвидности должен совпадать с формой выбора стоимостей для двух других компонентов формулы[12].

Прокомментируем понятия «стоимость дополнительной ликвидности» и «стоимость общей ликвидности»:

– стоимость *дополнительной* ликвидности (денежных средств) позволяет определить выгодность (или невыгодность) размещения денежных средств с издержками ликвидности L_c в неденежном активе с уже известной доходностью i_b и издержками ликвидности L_b;

– стоимость *общей* ликвидности (денежных средств) позволяет определить невыгодность (или выгодность) размещения денежных средств с издержками ликвидности L_c в неденежном активе с нулевой доходностью и издержками ликвидности L_b.

5.6. Классификация инвестиционной стоимости ликвидности и пример ее расчета

В заключение данного раздела систематизируем полученный материал в форме классификационной таблицы, в которой также представлен сквозной пример расчета указанных величин. В качестве условий примера предполагается:

– рыночная стоимость актива $MV = 1$ млн руб.;

– ставка доходности неденежного актива (облигаций) $i_b = 8\%$;

– издержки ликвидности неденежного актива (облигаций) $L_b = 1{,}113$;

– издержки ликвидности денежных средств $L_c = 1{,}01$;

– значение функции полезности неденежного актива (облигаций) $W_b = 0{,}97$;

– значение функции полезности денежных средств $W_c = 0{,}99$.

С учетом этих данных величина компенсаторного эквивалента, рассчитанная по формуле (28), приведет к значению 0,022.

Классификация инвестиционной стоимости ликвидности и пример ее расчета по предложенной модели приведены в таблице.

---

[11] Здесь и далее (в расшифровках выражений (34)–(35)) рыночная стоимость рассматривается только в контексте абсолютной стоимости.

[12] Примеры расчета указанных величин приведены в п. 5.6.

Таблица. Классификация инвестиционной стоимости ликвидности и пример ее расчета по предложенной модели

Определяемый вид и объект стоимости	Форма выражения и обозначение	Способы расчета	Расчет сквозного примера
Инвестиционная стоимость дополнительной ликвидности	Относительная $ALRV_c$	Относительная инвестиционная стоимость ликвидного актива минус относительная инвестиционная стоимость неликвидного актива с ненулевой доходностью равна единице, деленной на издержки ликвидности денежного актива минус сумма единицы и ненулевой доходности неденежного актива, деленная на издержки ликвидности неденежного актива, равна компенсаторному эквиваленту денежных средств, деленному на издержки ликвидности неденежного актива: $V_{la}(MV, L_c) - V_{nla}(MV, L_b, i_b) = 1/L_c - (1 + i_b)/L_b = CEQ/L_b$	0,99 − (1+0,08)/1,113 = = 0,020 = 0,022/1,113 = = 0,020
	Абсолютная $ALAV_c$	Абсолютная инвестиционная стоимость денежных средств минус абсолютная инвестиционная стоимость неденежного актива с ненулевой доходностью равна относительной инвестиционной стоимости дополнительной ликвидности, умноженной на рыночную стоимость актива, и равна произведению компенсаторного эквивалента и рыночной стоимости актива, деленных на издержки ликвидности неденежного актива: $M - V_{nla}(MV, L_b, i_b) = ALRV_c \times M = CEQ \times MV/L_b$	0,99 — 0,97 = 0,02 = =0,020 × 1 = 0,02 = = 0,022 × 1/1,113 = = 0,02 млн руб.
Инвестиционная стоимость общей ликвидности денежных средств	Относительная $TLRV_c$	Относительная инвестиционная стоимость ликвидного актива минус относительная инвестиционная стоимость неликвидного актива с нулевой доходностью равна единице, деленной на издержки ликвидности денежных средств, минус единица, деленная на издержки ликвидности неденежного актива: $V_{la}(MV, L_c) - V_{nla}(MV, L_b, i_b = 0) = (1/L_c - 1/L_b)$	1/1,01 − 1/1,113 = 0,092
	Абсолютная $TLAV_c$	Абсолютная инвестиционная стоимость денежных средств минус абсолютная инвестиционная стоимость неденежного актива с нулевой доходностью равна произведению рыночной стоимости неденежного актива на разность относительной инвестиционной стоимости денежного актива и относительной инвестиционной стоимости неденежного актива с нулевой доходностью: $V_{la}(MV, L_c) - V_{nla}(MV, L_b, i_b = 0) = MV(1/L_c - 1/L_b)$	0,99 − 0,898 = = 0,092 млн руб. 1× (1/1,01−1/1,113) = = 0,092 млн руб.
Инвестиционная стоимость ликвидного актива	Относительная $V_{la}(MV, L_c)$	Относительная инвестиционная стоимость неликвидного актива с ненулевой доходностью плюс относительная стоимость дополнительной ликвидности равна относительной инвестиционной стоимости неликвидного актива с нулевой доходностью плюс относительная стоимость общей ликвидности равна единице, деленной на издержки ликвидности денежных средств: $V_{nla}(MV, L_b, i_b) + ALRV_c = V_{nla}(MV, L_b, i_b = 0) + TLRV_c = 1/L_c$	0,97 + 0,02 = 0,898+0,092 = 1/1,01 = 0,99
	Абсолютная $V_{la}(MV, L_c)$	Сумма денежных средств (или рыночная стоимость неденежного актива), деленная на издержки ликвидности денежных средств: MV/L_c	1 /1,01 = 0,99 млн руб.

Окончание таблицы

Определяемый вид и объект стоимости	Форма выражения и обозначение	Способы расчета	Расчет сквозного примера
Инвестиционная стоимость неликвидного актива, генерирующего доходность i_b	Относительная $V_{nla}(MV, L_b, i_b)$	Относительная инвестиционная стоимость ликвидного актива минус относительная стоимость дополнительной ликвидности равна единице, деленной на издержки ликвидности денежных средств, минус компенсаторный эквивалент, деленный на издержки ликвидности неденежного актива, и равна сумме единицы и ненулевой доходности неденежного актива, деленной на издержки ликвидности неденежного актива: $V_{la}(MV, L_c) - ALRV_c = (1/L_c - CEQ/L_b) = (1 + i_b)/L_b$	0,99 – 0,02 = 0,97= = 1/1,01 – 0,022/1,113 = 0,97= 1,08/1,113 = 0,97
	Абсолютная $V_{nla}(MV, L_b, i_b)$	Сумма единицы и доходности неденежного актива, разделенная на издержки ликвидности неденежного актива: $(1 + i_b)MV/L_b$	1,08/1,113 × 1 = = 0,97 млн руб.
Инвестиционная стоимость неликвидного актива с нулевой доходностью	Относительная $V_{nla}(MV, L_b, i_b = 0)$	Относительная инвестиционная стоимость ликвидного актива минус относительная стоимость общей ликвидности равна единице, деленной на издержки ликвидности неденежного актива: $V_{la}(MV, L_c) - TLRV_c = 1/L_b$	0,99 – 0,092 = 0,898= = 1/1,113 = 0,898
	Абсолютная $V_{nla}(MV, L_b, i_b = 0)$	Рыночная стоимость неденежного актива, деленная на издержки ликвидности неденежного актива: MV/L_b	1 /1,113 = 0,898 млн руб.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Выражения для расчета издержек ликвидности

Приведем формулы расчета издержек ликвидности, входящие в состав выражений (25)–(35).

Выражение для оценки издержек ликвидности денежных средств:

$$L_C = 1 + P_1\left(\frac{S_0}{C} + \frac{i_X t_0}{T}\right). \qquad (П1)$$

Выражение для оценки издержек ликвидности неденежных средств *с позиции конкретного инвестора*:

$$L_b = 1 + P_1\left[\frac{S_o}{C} + \frac{i_x t_o}{T} + \frac{S_{bo}}{C} + \left(i_x - i_b\right)\left(\frac{\tau}{T}\right)\left(1 - P_2(\tau)\right)\right], \qquad (П2)$$

где L_c — индивидуальные издержки ликвидности денежных средств, доли единицы; L_b — индивидуальные издержки ликвидности облигаций, доли единицы; S_0 — постоянные издержки обслуживания расчетного счета, руб.; C — сумма денежных средств или рыночная стоимость активов, участвующих в конвертации, руб.; S_0/C — постоянная составляющая издержек инвестирования денежных средств (C), выраженная в относительной форме, доли единицы; S_{b0} — постоянные издержки при продаже облигаций (в общем случае неденежного актива), руб.; S_{b0}/C — постоянная составляющая издержек продажи ценных бумаг (в общем случае неденежного актива) на сумму C, выраженная в относительной форме, доли единицы; i_x — процентная ставка доходности по проекту X,% или доли единицы; t_0 — время, необходимое для конвертации денежных средств в проект X; i_b — процентная ставка доходности по облигации,% или доли единицы; τ — среднее время продажи облигации (в общем случае неденежного актива) с момента выставления котировки или предложения на продажу до момента совершения сделки; T — период времени, к которому привязаны ставки доходности: например, если ставки доходности выражены в процентах годовых, то T равен одному году при выражении τ и t_0 в долях года или 365 дням при выражении i_b, i_x, τ и t_0 в днях; P_1 — вероятность возникновения необходимости конвертации актива за расчетный интервал времени, равный ожидаемому времени хранения актива $T_{ож}$ в соответствующей форме, $0 \le P_1 \le 1$; $P_2(\tau)$ — вероятность продажи облигаций (в общем случае — неденежного актива) за время τ без снижения существующих котировок, $\tau \ge t_0$, $0 < P_2 \le 1$.

Отметим, что при наличии признаваемых котировок на продажу и покупку неденежного актива оценка издержек ликвидности неденежных средств *с позиции обезличенного инвестора* может быть осуществлена

путем определения ценового спреда, поскольку: во-первых, ценовой спред сам по себе является транзакционной издержкой сделки; во-вторых, временно́й фактор является априори включенным (учтенным) в разнице спредов котировок менее и более ликвидного активов; в-третьих, при сравнении денежных средств и неденежного актива вышеуказанная разница спредов по сути представляет собой лишь спред менее ликвидного неденежного актива, поскольку зачастую спред более ликвидных денежных средств минимален или отсутствует вовсе (разница между депозитной и кредитной ставками овернайт).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Денин Н.С. (2020). Требуемая дополнительная доходность низколиквидных активов // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. № 8 (227). С. 14–22. [**Denin N.S.** (2020). Required additional return on low liquid assets. *Property Relations in the Russian Federation Journal,* 8, 227, 14–22 (in Russian).]

Шарп У.Ф., Александер Г. Дж., Бейли Дж.В. (1997). Инвестиции. Пер. с англ. М.: Инфра-М. 1024 с. [**Sharp W., Alexander G., Baily G.** (1997). *Investments.* Translation from the English. Moscow: Infra-M (in Russian).]

Amihud Y., Mendelson H. (1986). Asset pricing and the bid-ask spread. *Journal of Financial Economics*, 17, 223–250.

Datar V.T., Naik N.Y. (1998). Radcliffe R. Liquidity and stock returns: An alternative test. *Journal of Financial Markets,* 1, 203–219.

Finnerty J.D. (2012). An average-strike put option model of marketability discount. *The Journal of Derivatives,* Summer, 19 (4), 53–69. DOI: 10.3905/jod.2012.19.4.053

Longstaff F.A. (1995). How much can marketability affect security values? *Journal of Finance*, 50, 1767–1774.

Lundgren D., Huang X. (2019). Liquidity modeling in real estate using survival analysis. Available at: https://www.infoq.com/presentations/liquidity-modeling-risk/

Liquidity phenomenon: Essence, criteria, properties and impact on the market and investment value of assets

© 2022 Yu.V. Kozyr

Yu.V. Kozyr,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia; e-mail: y_k65@mail.ru

Received 02.11.2021

Abstract. The paper is devoted to the study of the “liquidity” phenomenon from the standpoint of the economic and mathematical approach. The existing definitions are presented, as well as four criteria of liquidity and one criterion of illiquidity. Theoretical analysis of the properties of liquidity was carried out. Particular attention is paid to such transaction costs as spread and time factor. It is shown that liquidity is not an immanent category of an asset — it is a derivative of several factors characteristic of both the asset and its market environment. Based on the analysis, a microeconomic condition for emergence of liquidity phenomenon, possible methods and ways of identifying the degree of liquidity, as well as methods for assessing liquidity costs are proposed. Additionally, methods are proposed for assessing the economic benefits of liquidity and their contribution to the cost of similar and different assets. To assess the individual benefits of liquidity, the concepts of “equalizing rate” and “compensatory equivalent” were introduced, which are subsequently integrated into the methodology for assessing total and additional liquidity, expressed in relative or absolute (monetary) forms. The final part presents the classification of liquidity types, its combination with the investment value of liquid and illiquid assets, as well as an example of an end-to-end calculation of the proposed values. The appendix contains calculation formulas for assessing liquidity costs. The methodology of calculations proposed in the article can be applied when assessing the investment attractiveness of assets, choosing options for placing assets in the form of cash, securities or real estate.

Keywords: liquidity, market value, investment value, evaluation, asset, object of assessment, economic benefit, discount for lack marketability.

JEL Classification: C58, D46, G31, G32, G33, M58.

Quoting: **Kozyr Yu.V.** (2022). Liquidity phenomenon: Essence, criteria, properties and impact on the market and investment value of assets. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 48–60. DOI: 10.31857/S042473880018961-6

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 61–69

НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Эволюция евроазиатских отношений в духе Великого шелкового пути: обзор научных материалов

© 2022 г. К.Х. Зоидов, Н.С. Зиядуллаев, А.А. Медков

К.Х. Зоидов,
Институт проблем рынка, Российская академия наук, Москва; e-mail: kobiljonz@mail.ru

Н.С. Зиядуллаев,
Институт проблем рынка, Российская академия наук, Москва; e-mail: nabi926@mail.ru

А.А. Медков,
Институт проблем рынка, Российская академия наук, Москва; e-mail: medkov71@mail.ru

Поступила в редакцию 30.08.2021

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-110-50567 Экспансия.

Аннотация. В обзорной статье на основе методов эволюционно-институциональной теории, системной парадигмы, аналитической оценки и исторического подхода дан всесторонний обзор научных материалов, касающихся эволюции торгово-экономических и военно-политических евроазиатских отношений и организационно-институциональных направлений возрождения духа Великого шелкового пути (ВШП) в качестве инструмента инновационно-интеграционного взаимодействия на пространстве глобальной Евразии, в том числе и без участия Китая. Исследование является продолжением работ авторов, связанных с анализом последствий Инициативы КНР «Пояс и путь» в качестве «мягкой силы» распространения китайского мирового влияния. Приведены обзор, классификация и анализ научных материалов, касающихся различных форм геополитического противоборства государств и регионов за контроль над торговыми путями, который может осуществляться как путем образования огромной империи, так и создания межгосударственно-корпоративного партнерства в целях обеспечения экономической безопасности торговли на дальние расстояния от Средиземноморья и Северной Европы до Восточной Азии. Показано, что установление евроазиатских отношений происходило в различных узловых точках и территориях мирового хозяйства: Центральной Азии, итальянских торговых республиках, странах Северной Европы, а также путем создания европейскими государствами глобальных торговых империй и квазигосударственных корпоративных структур. Приведена систематизация рисков и негативных последствий функционирования современных торговых путей, возрождения духа ВШП на политико-экономическое положение России. Особое внимание уделено научным исследованиям, в которых содержится предостережение от чрезмерно активного вовлечения страны в мировую торговлю. Определены векторы участия России в качестве лидера инновационно-индустриального развития торговых путей XXI в., прежде всего в направлении Север–Юг.

Ключевые слова: эволюционно-институциональная теория, транзитная экономика, Великий шелковый путь, политико-экономические отношения, военно-стратегические отношения, торговые пути, организации, институты, ЕАЭС, глобальная Евразия.

Классификация JEL: R40, N70, F15–17.

Цитирование: **Зоидов К.Х., Зиядуллаев Н.С., Медков А.А.** (2022). Эволюция евроазиатских отношений в духе Великого шелкового пути: обзор научных материалов // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 61–69. DOI: 10.31857/S042473880018965-0

ВВЕДЕНИЕ

Актуальные проблемы современности — масштабный финансово-экономический кризис, разбалансировка глобальной транспортно-логистической системы, пандемия коронавируса и мероприятия борьбы с ней, изменение геополитической обстановки в Евразии, связанное прежде всего с событиями в Афганистане, и др. — требуют выработки эффективной стратегии мирового сообщества, в основе которой может и должно быть положено возрождение духа Великого шелкового пути (ВШП) с учетом сопутствующих рисков для национальных государств и наднациональных интеграционных объединений.

Изначально ВШП был не только торговой дорогой, это был культурно-экономический мост между цивилизациями (Мотовиц, Пенькова, 2018). Как отмечает Ю. Латов (Латов, 2010, с. 123–140), история ВШП демонстрирует ряд тенденций политико-экономического характера, которые остаются актуальными и в современной мирохозяйственной практике, а именно:

– мирохозяйственные отношения стимулируют конкуренцию между несколькими большими цивилизационными сообществами;

– устойчивыми являются полицентричные системы регулирования мирохозяйственных отношений, а единоцентричная реализация регулирующего воздействия носит, как правило, относительно краткосрочный характер и не отличается устойчивостью.

В свою очередь, «распад ВШП привел к ликвидации опыта мирных торгово-культурных контактов, которые сменились колониальной агрессией европейских стран» (там же, с. 138).

После развала СССР появились новые концепции национального строительства, в разработке которых одно из центральных мест занимало осмысление историко-экономического опыта как отдельных регионов, так и евразийского пространства в целом.

Рост военных бюджетов, многочисленные локальные конфликты, распространение экстремистских идеологий, проявления терроризма, производство, перевозка и потребление наркотических веществ, участившиеся стихийные бедствия и катастрофы техногенного и антропогенного характера, острейшие социальные проблемы приводят к осознанию естественной и объективной необходимости возрождения ВШП, а главное — его духа на качественно новой основе (Омуралиев, Осмоналиев, 2014). Как подчеркивает А. Ельчанинов (Ельчанинов, 2019), актуальность изучения ВШП заключается в том, что это пример длительного мирного сосуществования между крупными цивилизациями прошлого.

В работе (Косов, Шматко, 2016) выделяется инновационно-индустриальная роль ВШП, выражавшаяся прежде всего в том, что по нему происходил обмен технологиями между Востоком и Западом. В целом, контроль Шелкового пути давал доступ к информации и идеям, которые можно было скопировать и использовать за тысячи миль от места их появления (Франкопан, 2018).

Организация караванной торговли в равной степени требовала как дипломатических усилий, так и создания, модернизации и содержания протяженной инфраструктурной сети (экономических поясов) торгового пути (Баллард, 2012; Груссе, 2020; Кроули, 2015; Пейн, 2017).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Политико-экономические аспекты функционирования транспортно-транзитных систем и инфраструктурно-интеграционных образований

После выдвижения Китаем инициативы «Пояс и Путь» с 2013 г. только на территории Синьцзян-Уйгурского автономного района было создано пять новых аналитических центров и три института, деятельность которых направлена на теоретическую разработку и практическую реализацию сухопутного проекта «Экономический пояс Шелкового пути».

Это еще одно свидетельство того, что КНР уделяет много внимания решению задач безопасности и развития Синьцзян-Уйгурского автономного района и других западных провинций. В работе (Семенова, 2018, с. 233) автор отмечает, что «борьба с наркотрафиком и терроризмом в Центральной Азии является объединяющим фактором для РФ и КНР».

На пространстве глобальной Евразии Россия занимает выгодное географическое положение. Транспортные сети позволяют формировать на ее территории развитую систему международных транспортных коридоров как в меридиональном, так и в широтном направлениях.

Однако Транссибирская железнодорожная магистраль (Транссиб) — основа транспортно-транзитной системы России — наиболее грузонапряженная железная дорога, и в краткосрочной перспективе возможно достижение ее предельной пропускной способности. Поэтому увеличение транзитных потоков может усложнить передвижение экспортно-импортных грузов.

Одновременно КНР малоинтересны «меридиональные» коридоры по направлению Север–Юг, которые исключительно важны и для Казахстана, и для России (направления на Иран, Ближний Восток, в перспективе — на Индию).

Экономические категории не всегда являются определяющими в ходе интеграционного строительства в ЕАЭС ввиду большей значимости факторов политической стабильности, безопасности и общих ценностей (Lissovolik, Pak, Zhang, 2021).

Рассматривая направления инновационного развития инфраструктуры пространства глобальной Евразии, Е. Пак отмечает, что одной из перспектив сотрудничества стран–членов Евразийского экономического союза (ЕАЭС) в области транспорта и логистики может стать «зеленый» транспорт и внедрение интеллектуальных транспортных систем (Pak, 2021).

В работе (Пак, 2021) подчеркнуто, что в настоящее время диалог КНР — страны–члены ЕАЭС в области транспорта и логистики ведется преимущественно на двусторонней основе, что препятствует выработке единой и, возможно, более сильной позиции стран в формате ЕАЭС–КНР.

Е. Пак убедительно доказал, что в настоящее время казахстанский участок международного транспортного коридора «Восток–Запад» выигрывает конкуренцию у российской транспортно-транзитной системы за сухопутные транзитные грузопотоки в направлении КНР–ЕС (Пак, 2020). Организационно-институциональным механизмом повышения конкурентных преимуществ международных транспортных коридоров является государственно-частное партнерство (Пак, 2018).

Как справедливо отмечает Ц. Чжун (Чжун, 2018), соседние с Китаем государства, а также государства, расположенные вдоль маршрутов инициативы «Пояс и путь»,— это преимущественно страны с формирующимися рынками и развивающиеся.

В целом отмечается (Антипов, 2014), что еще в 2014 г. в КНР утвердилось представление о необходимости более масштабного сочетания в евроазиатских отношениях экономических и политических, а при необходимости — и военных рычагов. Такой подход можно рассматривать как прямое следствие «арабской весны» и конфликтной ситуации вокруг свободы судоходства в Южно-Китайском море.

Эволюция способов вооруженной поддержки функционирования транспортно-транзитных систем и проблемы обеспечения безопасности торговли на дальние расстояния

Понимание места и роли ВШП в истории человечества, его политико-экономического и военно-стратегического значения невозможно без подхода, содержащегося в книге (Хансен, 2014), где торговый путь рассматривается в контексте проникновения Китайской империи в регионы Центральной Азии и удержания их путем размещения и финансирования военных гарнизонов.

Характеризуя геополитическую обстановку V–VIII вв., в работе (Элеманова, 2016) отмечается, что поскольку расположение торгового центра на участке ВШП давало большое преимущество любому государственному образованию, то каждое из них стремилось поставить под свой контроль как можно более протяженный участок торгового пути. В связи с этим весь период Средневековья велись нескончаемые войны за овладение важными торговыми центрами.

Транспортно-транзитные коммуникации не только требуют обеспечения безопасности их прохождения, политической стабильности и экономического процветания, но и сами служат для передвижения завоевателей, например армии Чингисхана (Тугужекова, 2018). Но в дальнейшем период Монгольской империи был временем расцвета ВШП. Г. Вернадский подчеркивает, что, объединив большую часть Евразии под единым правлением, монголы преуспели, хотя и на относительно недолгий период, в обеспечении безопасности великого сухопутного пути (Вернадский, 2016).

Особенно наглядной эволюция и тесная взаимосвязь внешнеполитических, дипломатических, военно-стратегических и транспортно-торговых отношений показана в книге (Фауст, 2019), который рассматривает еще один торговый путь из Китая в Европу через территорию России — Великий чайный путь. В ней акцентировано внимание на анализе усилий правительства и частных предпринимателей, направленных на упорядочение российско-китайской торговли как в виде создания объединений купцов, так и в форме государственной монополии.

Политико-экономические проблемы получения и концентрации доходов от торгово-транзитной деятельности. В Средние века Центральная Азия во многом зависела от транзитной торговли — потока товаров, которые производились и потреблялись не в самом регионе, а в странах Европы, России и Китае. Такой тип торгового обмена не стимулировал местные ремесла, а препятствовал их развитию, позволяя местным жителям получать привозные товары, вместо того чтобы пытаться изготовить их.

Отсюда — повышенный интерес местной знати к торговым пошлинам, налогообложению торговцев и получению от них подношений в натуральной форме. Такое отношение к торговле стимулировало паразитизм элиты и дестимулировало предпринимательство. Воинственной и малообразованной местной знати было удобно жить на транзитную ренту. Целые племена специализировались на грабежах караванов и получении выкупа за их пропуск через «свою» территорию (Международные отношения..., 2014).

Согдиана — пример высокотехнологичной трансформации транзитной экономики. Однако в Центральной Азии имелись и яркие примеры инновационно-индустриального развития поясов торговых путей. Так, в IV–V вв. сама Центральная Азия выходит на западноевропейские рынки торговли шелком собственного производства. Здесь жители Согдианы, начав с посредничества в торговле китайском шелком, в дальнейшем сами освоили технологии получения как шелковых нитей, так и изготовления из них тканей (Акаев, Акаева, 2019). Подробные результаты исследования Согдианы изложены в статье (Исомитдинов, 2019).

Государство- и корпоративообразующая функция торгово-транзитной деятельности

Устойчивости экономических связей между Кыпчаком (Великой степью) и Ираном, которые не прерывались даже во времена обострения политических отношений между Золотой Ордой и империей ильханов в Персии, в немалой степени способствовала деятельность представителей итальянских торговых республик Генуи и Венеции (Шпулер, 2017). Таким образом, обслуживание евроазиатских торговых отношений было фактором образования и процветания этих транзитных городов-государств.

Историческое доминирование исламского мира и азиатских стран в мировой торговле. Исследователи отмечают, что эволюция политико-экономических и военно-стратегических евроазиатских отношений изначально характеризовалась доминированием исламского мира и азиатских стран в мировой торговле (Брэдфорт, 2019, с. 346). В (Голдстоун, 2014) отмечалось, что торговая экспансия Европы после 1500 г. свидетельствовала не о превосходстве, а о подключении Европы к уже существовавшей сети океанской торговли с центром в Азии.

Возрождение духа ВШП и угрозы для России. Формирование нового ВШП, а главное, возрождение его духа, несет как немалые выгоды, так и многочисленные и серьезные вызовы и угрозы, прежде всего, политико-экономического характера, для России и постсоветского пространства, главные из которых сгруппированы в таблице.

Как отмечал Н. Трубецкой (Трубецкой, 2019), зачастую участие государства в мировой торговле, особенно морской, имеет искусственный характер. Особенно такой огромной, обладающей разнообразными ресурсами страны, как Россия. Дело в том, что географические природные условия Западной Европы обеспечивали естественное стремление европейских стран к открытому морю, дающему возможность развить колониальную торговлю. И Россия «из чистого подражания европейским державам тоже усвоила это направление внешней политики, несмотря на то, что ее собственная географическая природа была совершенно иной и ставила перед ней абсолютно иные исторические задачи» (Трубецкой, 2019).

Другой риск развития транспортно-транзитной системы на пространстве глобальной Евразии состоит в том, что транзитные грузы, следующие по маршрутам Нового Шелкового пути, будут частично оседать на территориях стран прохождения международных транспортных коридоров, вытесняя товары национальных производителей (Гончаренко, 2017).

Проводя в жизнь проект Нового Шелкового пути, Китай фактически рассечет по горизонтали Евразийский материк, разделит Север и Юг Евразии, отделит Россию от Индии и других стран Южной Азии, государств Центральной и Западной Азии. Этому в немалой степени способствуют попытки строительства железных дорог колеи 1435 мм на «пространстве 1520», периодически инициируемые Китаем на основных транзитных направлениях.

Стратегически важным направлением китайской геостратегии является Арктика. В последние годы в Китае *концепция интернационализации Арктики* стала одной из ведущих теоретических и стратегических разработок. Китай активно продвигает идею о необходимости распространить статус общечеловеческого наследия на регионы Арктики — подобно Антарктике. Особое внимание уделяется статусу Северного морского пути (Россия) и Северо-Западного прохода (Канада).

В целом, как для России, так и для Китая угрозу представляют такие явления, как:

– производство наркотиков в Афганистане и связанный с ним наркотрафик;

– проникновение исламских боевиков-фундаменталистов;

Таблица. Возрождение духа ВШП и политико-экономические угрозы для России

Угроза	Содержание	Направления противодействия
Чрезмерная вовлеченность в мировое хозяйство	Развитие экспортно-импортной и транзитной сфер в ущерб реальным и потенциальным возможностям национальной экономики и внутреннего рынка	Активная промышленная политика, прежде всего в виде организации и поддержки производств товаров с высокой добавленной стоимостью, реализация программ пространственного развития
Либерализация мировой торговли	Улучшение транспортной доступности территории для иностранных товаров, повышение их конкурентоспособности и доли на внутреннем рынке	Разумная протекционистская политика, повышение доступности кредитных ресурсов институтов развития, организация высокотехнологичных производств в инновационно-индустриальных поясах торговых путей
Формирование транзитных евро-азиатских маршрутов в обход территории России	Сокращение конкурентного преимущества страны как естественного моста между Европой и Азией, снижение транзитных доходов, формирование отличных технических стандартов транспортной инфраструктуры	Разработка, внедрение и распространение на главных евро-азиатских маршрутах принципиально новых технологий движения, контроль точек зарождения и поглощения грузопотоков, активная геоэкономическая политика государства и крупных корпораций
Развитие транзитного направления «Восток–Запад» в ущерб «Север–Юг»	Рост зависимости наполнения грузопотоками капиталоемкой инфраструктуры от Китая и ЕС, неполное использования транспортно-транзитного потенциала страны	Активное развитие МТК «Север — Юг» с использованием возможностей и заинтересованности Индии, Ирана, Пакистана, стран Южного Кавказа. Формирование новых маршрутов через Сибирь, Забайкалье, государства Центральной Азии и Афганистан
Интернационализация статуса, либерализация судоходства по Северному морскому пути	Снижение роли Северного морского пути как национальной транзитной артерии, сокращение доходов от транзитной перевозки грузов, рост условно-постоянных расходов на экспортные перевозки	Активное участие в развитии транзитных перевозок по СМП путем строительства новых ледоколов, производства судов-контейнеровозов ледового класса, модернизации навигационных, гидрографических и обстановочных сервисов
Снижение национальной безопасности вследствие возрождения духа ВШП	Рост наркотрафика, перевозки оружия и взрывчатых веществ, проникновение исламских боевиков, неконтролируемые потоки мигрантов	Создание и оснащение вооруженных формирований и служб безопасности межгосударственно-корпоративных структур по развитию современных торговых путей и их инновационно-индустриальных поясов

– неконтролируемые потоки мигрантов, возникающие в ходе военных конфликтов.

Ликвидировать эти угрозы можно лишь путем ускоренного экономического развития всех стран региона. Повышение жизненного уровня может стать основой для укрепления политической стабильности (Косов, Шматко, 2016).

Политико-экономические и военно-стратегические преимущества направления «Север—Юг» для России

В настоящее время предлагается инициировать вовлечение Индии в общий экономический процесс развития Севера и Юга Евразии в качестве мощного экономического и политического партнера. Для этого необходимо эффективное функционирование международных транспортных коридоров «Север–Юг», фактически повторяющих Великий Волжский путь и маршрут «хождения за три моря» Афанасия Никитина.

По мнению С. Гончаренко (Гончаренко, 2017), следует максимально расширить направление грузопотока международных транспортных коридоров «Север–Юг» на Север и Восток России в сторону Урала и Южной Сибири. Стратегическим сухопутным направлением, связывающим Россию и Индию, является возобновление проекта строительства железной дороги из Узбекистана через Афганистан (Кабул) и Пакистан (Пешавар) в направлении Дели.

Эволюция социально-культурных проявлений духа ВШП и накопление человеческого капитала

Е. Иноземцева (Иноземцева, 2015) обращает внимание, что торговля является важной основой межэтнической и межконфессиональной толерантности.

В государствах Центральной Азии торговлей пронизаны все стороны жизни даже на лингвистическом уровне. Так, как отмечает А. Алимов (Алимов, 2021, с. 248), с таджикского языка слово «Душанбе» переводится как «Понедельник», что может свидетельствовать о том, что по понедельникам здесь открывались шумные ярмарки и шла бойкая торговля товарами.

Мировой опыт показывает, что инновационные проблемы невозможно эффективно решить, опираясь только на национальные научные кадры. Необходимо использовать совместные научные достижения всего интеграционного объединения. В противовес утечке мозгов в США Россия и страны Центральной Азии должны активно участвовать в проведении НИОКР в области создания инфраструктуры ВШП (Ахмедова и др., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор научных материалов стал продолжением разработки теории транзитной экономики (Зоидов, Медков, 2021а, 2021б). Это народно-хозяйственная и эволюционно-институциональная система, главная отличительная особенность ее состоит в том, что весомую часть доходов и одну из основ благосостояния властей, хозяйствующих субъектов, работников и населения, межгосударственных, государственных, корпоративных образований, городов-государств и узловых точек мирового хозяйства составляют денежные и иные поступления от:

– пропуска по территории стран и подконтрольным зонам грузо- и пассажиропотоков, транспортных средств, энергетических, водных и информационных ресурсов;

– других видов экспорта транспортных, а также туристических услуг;

– реэкспорта товаров;

– функционирования сопутствующих производств;

– оказания услуг по обеспечению транзита и развитию инновационно-индустриальных поясов торговых путей.

Исследование эволюции политико-экономических и военно-стратегических евроазиатских отношений и выявление организационно-институциональных направлений возрождения духа ВШП привело к систематизации рисков и негативных последствий функционирования торговых путей: росту военных расходов, увеличению транзитных перевозок наркотических средств, формированию рентоориентированного поведения элит и незначительной части населения, распространению противоправных видов деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Акаев А.А., Акаева Б.А. (2019). Кыргызстан в эпоху цифровой экономики на новом Шелковом пути. М.: URSS. [**Akaev A.A., Akayeva B.A.** (2019). *Kyrgyzstan in the era of digital economy on the new silk road*. Moscow: URSS (in Russian).]

Алимов Р.К. (2021). О современном Китае, поясах сотрудничества и путях соразвития. М.: Издательство «Весь мир». 392 с. [**Alimov R.K.** (2021). *About modern China, cooperation belts and ways of co-development.* Moscow: Publishing house “The Whole world”. 392 p. (in Russian).]

Антипов К. (2014). О некоторых аспектах эволюции ближневосточной политики Китая // *Проблемы Дальнего Востока*. № 2. С. 27–37. [**Antipov K.** (2014). On some aspects of the evolution of China’s Middle East policy. *Problems of the Far East,* 2, 27–37 (in Russian).]

Ахмедова Д.А., Абдугафаров А.А., Абдугафарова Д.А., Рахматов Б.Б., Ахмаджанова Р.С. (2018). Влияние Евразийского экономического союза (ЕАЭС) и создание Шелкового пути на экономику Республики Таджикистан. В кн.: Инновационные подходы в решении проблем современного общества. Монография. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». С. 234–242. [**Akhmedova D.A., Abdugafarov A.A., Abdugafarova D.A., Rakhmatov B.B., Akhmadzhanova R.S.** (2018). The impact of the Eurasian Economic Union (EAEU) and the creation of the Silk Road on the economy of the Republic of Tajikistan. In: *Innovative approaches to solving the problems of modern society*. Monograph. Penza: ICSC “Science and Education”, Pp. 234–242 (in Russian).]

Баллард Дж.А. (2012). Властители Индийского океана. Становление морских связей между Европой и Азией. Пер. с англ. Л.А. Игоревского. М.: ЗАО Центрополиграф. 383 с. [**Ballard J.A.** (2012). *The rulers of the Indian Ocean. The formation of maritime relations between Europe and Asia*. Translated from the English by L.A. Igorevsky. Moscow: ZAO Centropolygraf. 383 p. (in Russian).]

Брэдфорт Э. (2019). История Средиземноморского побережья. Как боролись за мировое господство Рим и Карфаген, противостояли Византия и Османская империя. Пер. с англ. Л.А. Игоревского. М.: ЗАО Центрополиграф. 543 с. [**Bradfort E.** (2019). *The history of the Mediterranean coast. How Rome and Carthage fought for world domination, Byzantium and the Ottoman Empire opposed*. Translated from the English by L.A. Igorevsky. Moscow: ZAO Centropoligraf. 543 p. (in Russian).]]

Вернадский Г. (2016). Монголы и Русь. М.: Ломоносовъ. 512 с. [**Vernadsky G.** (2016). The *Mongols and Russia*. Moscow: Lomonosov. 512 p. (in Russian).]

Голдстоун Дж. (2014). Почему Европа? Возвышение Запада в мировой истории, 1500–1850. Пер. с англ. М. Рудакова; под ред. И. Чубарова. М.: Изд-во Института Гайдара. 224 с. [**Goldstone J.** (2014). *Why Europe? The Rise of the West in world History, 1500–1850.* Translated from the English by M. Rudakov. Edited by I. Chubarov. Moscow: Publishing house of the Gaidar Institute. 224 p. (in Russian).]

Гончаренко С.С. (2017). Стратегическое партнерство России и Индии в сфере евразийских международных транспортных коридоров. В сб.: Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2017. Труды Десятой международной конференции в двух томах. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. С. 399–404. [**Goncharenko S.S.** (2017). Strategic partnership between Russia and India in the field of Eurasian international transport corridors. In: *Managing the development of large-scale MLSD Systems' 2017.* Proceedings of the Tenth International Conference in two volumes. Under the general editorship of S.N. Vasiliev, A.D. Tsvirkun, 399–404 (in Russian).]

Груссе Р. (2020). Степные кочевники, покорившие мир. Под властью Аттилы, Чингизхана, Тамерлана. Пер. с франц. В.Е. Климанова. М.: ЗАО Центрполиграф. 527 с. [**Grousse R.** (2020). *Steppe nomads who conquered the world. Under the rule of Attila, Genghis Khan, Tamerlane*. Translated from the French by V.E. Klimanov. Moscow: ZAO Tsentrpoligraf. 527 p. (in Russian).]

Ельчанинов А.И. (2019). По Великому Шелковому пути — Ледовому Шелковому пути — дороге мира и экономического сотрудничества // *Культурологический журнал*. № 3 (37). С. 3. [**Yelchaninov A.I.** (2019). Along the Great Silk Road-the Ice Silk Road-the road of peace and economic cooperation. *Journal of Cultural Research,* 3 (37), 3 (in Russian).]

Зоидов К.Х., Медков А.А. (2021а). Проблемы эволюции транзитных систем и сопряжения инфраструктурных проектов формирования Большого Евразийского партнерства // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 2. С. 64–72. [**Zoidov K. Kh., Medkov A.A.** (2021). Problems of the evolution of transit systems and the interface of infrastructure projects for the formation of a Large Eurasian Partnership. *Economics and Mathematical Methods*, 57, 2, 64–72 (in Russian).]

Зоидов К.Х., Медков А.А. (2021б). Китайская инициатива «пояс и путь» — основа эволюционного развития и сопряжения инфраструктурно-интеграционных проектов на пространстве Большой Евразии (обзор научных подходов). Под ред. чл.-корр. РАН В.А. Цветкова. М.: ИПР РАН. 146 с. [**Zoidov K. Kh., Medkov A.A.** (2021b). *The Chinese belt and road initiative are the basis for the evolutionary development and integration of infrastructure and integration projects in the Greater Eurasia region (review of scientific approaches)*. Edited by Corresponding Member of the RAS V.A. Tsvetkov. Moscow: MEI RAS. 146 p. (in Russian).]

Иноземцева Е.И. (2015). Международная транзитная торговля — важный фактор межконфессиональной и межнациональной толерантности в средневековом Дербенте // *Вестник Института истории, археологии и этнографии*. № 1 (41). С. 33–40. [**Inozemtseva E.I.** (2015). International transit trade is an important factor of interfaith and interethnic tolerance in medieval Derbent. *Bulletin of the Institute of History, Archeology and Ethnography,* 1 (41), 33–40 (in Russian).]

Исомитдинов Ж.Б. (2019). Согдийцы — колонизаторы на трассе Великого Шелкового пути // *Ученые записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова*. Серия гуманитарно-общественных наук. № 3 (60). С. 19–25. [**Isomitdinov Zh.B.** (2019). Sogdians-colonizers on the route of the Great Silk Road. *Scientific notes of the Khujand State University academician B. Gafurov. Series of Humanities and Social Sciences*, 3 (60), 19–25 (in Russian).]

Косов Ю.В., Шматко А.Д. (2016). Исследование китайского проекта создания Экономического пояса Шелкового пути // *Евразийская интеграция: экономика, право, политика*. № 1 (19). С. 35–39. [**Kosov Yu.V., Shmatko A.D.** (2016). Study of the Chinese project to create the Silk Road Economic Belt. *Eurasian Integration: Economics, Law, Politics,* 1 (19), 35–39.]

Кроули Р. (2015). Венецианская республика. Расцвет и упадок великой морской империи. 1000–1503. Пер. с англ. Л.А. Игоревского. М.: ЗАО Издательство Центр-полиграф. [**Crowley R.** (2015). *Venetian Republic. The rise and fall of the great Maritime Empire. 1000–1503.* Translated from the English by L.A. Igorevsky. Moscow: ZAO Publishing house Center-polygraph (in Russian).]

Латов Ю.В. (2010). Великий Шелковый путь — пролог мировой экономики и глобализации (к 2130-летию его «открытия») // *Историко-экономические исследования*. Т. 11. № 1. С. 123–140. [**Latov Yu.V.** (2010). The Great Silk Road-the prologue of the world economy and globalization (to the 2130th anniversary of its "discovery"). *Historical and Economic Studies,* 11, 1, 123–140 (in Russian).]

Международные отношения в Центральной Азии: события и документы: Учеб. пособие для студентов вузов (2014). А.Д. Богатуров, А.С. Дундич, В.Г. Коргун и др. А.Д. Богадуров (отв. ред.). 2-е изд. М.: Издательство «Аспект Пресс». 560 с. [*International relations in Central Asia: Events and documents: A textbook for university students* (2014). A.D. Bogaturov, A.S. Dundich, V.G. Korgun et al. A.D. Bogadurov (ed.). 2nd ed. Moscow: Publishing house "Aspect Press". 560 p. (in Russian).]

Мотовиц Т.Г., Пенькова А.С. (2018). «Великий Шёлковый путь» — средство расширения и углубления регионального сотрудничества. В сб.: Актуальные вопросы юридической науки и практики. Материалы III Международной научно-практической конференции. С. 12–15. [**Motovits T.G., Penkova A.S.** (2018). "The Great Silk Road" — a means of expanding and deepening regional cooperation. In: *Topical issues of legal science and practice.* Materials of the III International Scientific and Practical Conference, 12–15 (in Russian).]

Омуралиев Ж., Осмоналиев К.М. (2014). Ренессанс Великого Шелкового пути: принципы сотрудничества и дипломатии // *Вестник Дипломатической академии Министерства иностранных дел Кыргызской Республики имени Казы Дикамбаева*. № 4. С. 189–195. [**Omuraliev Zh., Osmonaliev K.M.** (2014). Renaissance of the Great Silk Road: Principles of cooperation and diplomacy. *Bulletin of Kazy Dikambayeva Diplomatic Academy of the Ministry of Foreign Affairs of the Kyrgyz Republic,* 4, 189–195 (in Russian).]

Пак Е.В. (2018). Государственно-частное партнёрство как инструмент построения транзитной экономики ЕАЭС: пример России и стран Центральной Азии // *Вестник МГИМО-Университета*. № 5 (62). С. 174–183. DOI: 10.24833/2071-8160-2018-5-62-174-183 [**Pak E.V.** (2018). Public-private partnership as a tool for building the transit economy of the EAEU: The example of Russia and the countries of Central Asia. *Bulletin of MGIMO-University*, 5(62), 174–183. DOI: 10.24833/2071-8160-2018-5-62-174-183 (in Russian).]

Пак Е.В. (2020). Перспективы реализации транзитного потенциала РФ и Казахстана // *Мировая экономика и международные отношения*. Т. 64. № 11. С. 132–138. DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-11-132-138 [**Pak E.V.** (2020). Prospects for the implementation of the transit potential of the Russian Federation and Kazakhstan. *World Economy and International Relations*, 64, 11, 132–138. DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-11-132-138 (in Russian).]

Пак Е.В. (2021). Участие КНР в инфраструктурном строительстве на территории России и Казахстана. Инициатива «Один пояс, один путь» // *Российский внешнеэкономический вестник*. № 1. С. 93–125. DOI: 10.24411/2072-8042-2021-1-93-105 [**Pak E.V.** (2021). China's participation in infrastructure construction in Russia and Kazakhstan. The initiative "One belt, one road". *Russian Foreign Economic Bulletin*, 1, 93–125. DOI: 10.24411/2072-8042-2021-1-93-105 (in Russian).]

Пейн Л. (2017). Море и цивилизация. Мировая история в свете развития мореходства. Пер. с англ. И.В. Майгуровой. М.: АСТ. [**Payne L.** (2017). *The sea and civilization. World history in the light of the development of navigation*. Translated from the English. Moscow: AST (in Russian).]

Семенова Н.К. (2018). Евразийская транспортная интеграция: начало пути. В сб.: «Управление развитием крупномасштабных систем mlsd'2018. Труды Одиннадцатой международной конференции». В 3 т. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. С. 232–239. [**Semenova N.K.** (2018). Eurasian transport integration: The beginning of the road. In: *Managing the development of large-scale MLSD Systems' 2018.* Proceedings of the Eleventh International Conference. In 3 vol. Gen. eds. by S.N. Vasiliev, A.D. Tsvirkun, 232–239 (in Russian).]

Трубецкой Н.С. (2019). Евразийство: избранное. Монография. М.: ИНФРА-М. 358 с. [**Trubetskoy N.S.** (2019). *Eurasianism: Selected: monograph*. Moscow: INFRA-M. 358 p. (in Russian).]

Тугужекова В.Н. (2018). Роль Шелкового пути в распространении религии в Южной Сибири. В сб.: Исламский фактор в интеграционных процессах Великого Шелкового пути. Материалы II Международной научно-богословской конференции «Духовный Шелковый путь. Созидание. Интеграция». Сер. «Духовный Шелковый путь». С. 170–179. [**Tuguzhekova V.N.** (2018). The role of the Silk Road in the spread of religion in Southern Siberia. In: T*he Islamic factor in the integration processes of the Great Silk Road*. Materials of the II International Scientific and Theological Conference "The Spiritual Silk Road. Creation. Integration". Series "The Spiritual Silk Road", 170–179 (in Russian).]

Фауст К. (2019). Великий торговый путь от Петербурга до Пекина. История российско-китайских отношений в XVIII — XIX веках. Пер. с англ. С.А. Белоусова. М.: ЗАО Центрполиграф. [**Faust K.** (2019). *The Great Trade Route from St. Petersburg to Beijing. The history of Russian-Chinese relations in the XVIII–XIX centuries*. Translated from the English by S.A. Belousova. Moscow: ZAO Tsentrpoligraf (in Russian).]

Франкопан П. (2018). Шелковый путь. Пер. с англ. Ю.В. Шаршуковой. М.: Издательство «Э». 688 с. [**Frankopan P.** (2018). *Silk road*. Translated from the English by Yu.V. Sharshukova. Moscow: Publishing house "E". 688 p. (in Russian).]

Хансен В. (2014). Великий шелковый путь. Портовые маршруты через Среднюю Азию. Китай–Согдиана–Персия–Левант. Пер. с англ. С.А. Белоусова. М.: ЗАО Издательство Центрполиграф. 477 с. [**Hansen V.** (2014). *The Great Silk Road. Port routes through Central Asia. China-Sogdiana-Persia-Levant*. Translated from the English by S.A. Belousova. Moscow: ZAO Publishing House Tsentrpoligraf. 477 p. (in Russian).]

Чжун Ц. (2018). «Один пояс — один путь» как новая форма диалога между Китаем и цивилизациями // *Ярославский педагогический вестник*. № 1. С. 239–243. [**Zhong Ts.** (2018). "One belt — one way" as a new form of dialogue between China and civilizations. *Yaroslavl Pedagogical Bulletin,* 1, 239–243 (in Russian).]

Шпулер Б. (2017). Золотая Орда. Монголы на Руси. 1223–1502. Пер. с нем. С.Ю. Чупрова. М.: ЗАО Центрполиграф. 415 с. [**Spooler B.** (2017). *The Golden Horde. Mongols in Russia. 1223–1502.* Translated from German by S. Yu. Chuprova. Moscow: ZAO Tsentrpoligraf. 415 p. (in Russian).]

Элеманова Р.Т. (2016). История Великого Шелкового пути на территории Кыргызстана // *Дневник Алтайской школы политических исследований*. № 32. С. 334–336. [**Elemanova R.T.** (2016). The history of the Great Silk Road in Kyrgyzstan. *Diary of the Altai School of Political Studies*, 32, 334–336.]

Lissovolik Y.D., Pak E.V., Zhang H. (2021). Economic framework for Eurasian integration: Theory and practice. In: *The economic dimension of Eurasian integration*. N.A. Piskulova (ed.). Cham: Palgrave Macmillan. DOI: 10.1007/978-3-030-59886-0_1

Pak E.V. (2021). Transport and Logistics in the EAEU. In: *The economic dimension of Eurasian integration*. N.A. Piskulova (ed.). Cham: Palgrave Macmillan. DOI: 0.1007/978-3-030-59886-0_6

The evolution of Eurasian relations in the spirit of Great Silk Road: Review of the scientific materials

© 2022 K. Kh. Zoidov, N.S. Ziyadullaev, A.A. Medkov

K.Kh. Zoidov,
Market Economy Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: kobiljonz@mail.ru

N.S. Ziyadullaev,
Market Economy Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: nabi926@mail.ru

A.A. Medkov,
Market Economy Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: medkov71@mail.ru

Received 30.08.2021

The research was made with the financial support of the Russian Foundation for basic research (RFBR) in the framework of the scientific project no. 20-110-50567.

Abstract. In the review article, based on the methods of evolutionary and institutional theory, system paradigm, analytical assessment and historical approach, a comprehensive review of scientific materials concerning the evolution of trade, economic and military-political Euro-Asian relations and organizational and institutional directions of the revival of the spirit of the Great Silk Road (GSR) as an instrument of innovation and integration interaction in the space of global Eurasia, including without the participation of China, is given. The study is a continuation of the authors' work on the analysis of the consequences of the PRC's Belt and Road Initiative as a "soft power" for the spread of Chinese global influence. The review, classification and analysis of scientific materials concerning various forms of geopolitical confrontation between states and regions for control over trade routes, which can be carried out both through the formation of a huge empire and the creation of interstate-corporate partnership in order to ensure the economic security of long-distance trade from the Mediterranean and Northern Europe to East Asia, are presented. It is shown that the establishment of Euro-Asian relations took place in various nodal points and territories of the world economy: Central Asia, the Italian trade republics, the Nordic countries, as well as through the creation of global trade empires and quasi-state corporate structures by European states. The systematization of risks and negative consequences of the functioning of modern trade routes, the revival of the spirit of the GSR on the political and economic situation of Russia is given. Special attention is paid to scientific research, which warns against overly active involvement of the country in world trade. The vectors of Russia's participation as a leader in the innovative and industrial development of trade routes of the XXI century, primarily in the North-South direction, are determined.

Keywords: evolutionary and institutional theory, transit economy, Great Silk Road, political and economic relations, military and strategic relations, trade routes, organizations, institutions, EAEU, global Eurasia.

JEL Classification: R40, N70, F15–17.

Quoting: **Zoidov K. Kh., Ziyadullaev N.S., Medkov A.A.** (2022). The evolution of Eurasian relations in the spirit of Great Silk Road: Review of the scientific materials. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 61–69. DOI: 10.31857/S042473880018965-0

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 70–79

НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Цифровая технология организации централизованных закупок

© 2022 г. Н.А. Алейникова, М.Г. Матвеев

Н.А. Алейникова,
Воронежский государственный университет, Воронеж; e-mail: balbashovan@mail.ru

М.Г. Матвеев,
Воронежский государственный университет, Воронеж; e-mail: mgmatveev@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.08.2021

Аннотация. Статья посвящена разработке моделей для обеспечения цифровой трансформации процессов в системах корпоративных и государственных закупок. В частности, рассматривается решение задачи многокритериального выбора в экономических системах, описываемых трехдольным графом «производитель — ресурс — потребитель». Предложена математическая модель оптимального распределения однородного ресурса от поставщиков к потребителям в условиях централизованной схемы закупок, которая сводится к транспортной задаче с промежуточными пунктами. Оптимизация направлена на достижение максимального соответствия по совокупности технических и коммерческих характеристик однородного ресурса. Для формулирования требований по этим характеристикам потребителю предлагается использовать нечеткие переменные, что дает ему гибкий механизм описания требований к ресурсу с учетом его предпочтений. Предложен оператор агрегирования локальных соответствий по совокупности характеристик в виде дискретного интеграла Шоке с нечеткой мерой. На примере производственного оборудования показано, как можно формализовать параметры модели, а затем оптимизировать и автоматизировать процесс распределения оборудования с помощью решения транспортной задачи с промежуточными пунктами так, чтобы было достигнуто максимальное соответствие его характеристикам. Разработанные модели и алгоритмы могут быть использованы при создании информационных сервисов на электронных торговых площадках, в том числе и государственных закупок.

Ключевые слова: цифровая трансформация; централизованная система закупок; однородный ресурс; лингвистические и нечеткие переменные; агрегирование; интеграл Шоке; нечеткая мера; многокритериальный выбор; транспортная задача с промежуточными пунктами.

Классификация JEL: M15.

Цитирование: **Алейникова Н.А., Матвеев М.Г.** (2022). Цифровая технология организации централизованных закупок // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 70–79. DOI: 10.31857/S042473880018980-7

ВВЕДЕНИЕ

В практических приложениях часто встречаются социально-экономические системы, описываемые трехдольными графами, в частности к ним относятся закупки однородных производственных ресурсов. Эти системы включают в себя три непересекающихся множества вершин (элементов). Внутреннее множество интерпретируется как множество взаимозаменяемых типов однородного ресурса. Элементы двух внешних множеств ассоциированы с производителями и потребителями ресурса: $V^1 = \{v_i^1\},\ i = 1, \ldots, n$ — производители, $V^2 = \{v_j^2\},\ j = 1, \ldots, m$ — ресурсы, $V^3 = \{v_k^3\},\ k = 1, \ldots, d$ — потребители. На рис. 1 показана структурная схема такой системы. Множество однородных, взаимозаменяемых ресурсов представлено разнообразием значений своих технических характеристик — x^2 (размер, мощность, производительность и т.п.) и коммерческих характеристик — y^2 (цена, срок и условия поставки и т.п.). На этом множестве производители формируют подмножества своих предложений с характеристиками $(x^1; y^1)$, а потребители — свой спрос $(x^3; y^3)$. Чем больше мощность пересечения подмножеств спроса и предложения, тем эффективнее будет работать система закупок. Состав и наименования характеристик спроса и предложения идентичны и определяются единым товарным классификатором.

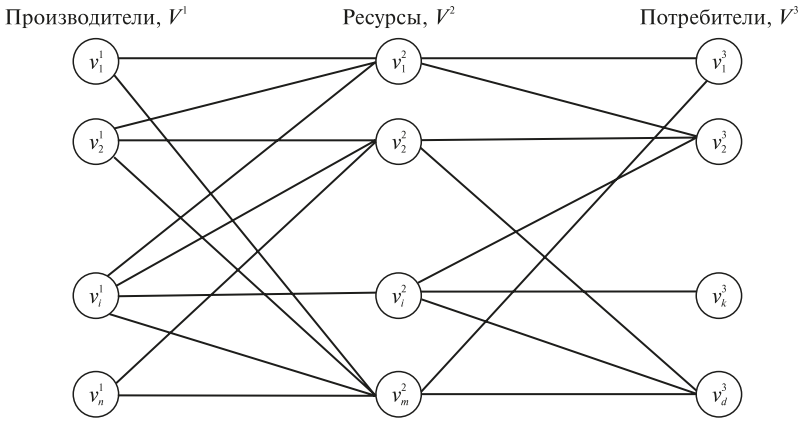


Рис. 1. Структурная схема трехдольного графа «производители — ресурсы — потребители»

Наиболее распространенной моделью закупок является выбор производителя $v_i^1 \in V^1$ для каждого потребителя $v_k^3 \in V^3$ так, чтобы обеспечить наилучшее значение некоторого коммерческого (экономического) критерия, $Q(y_{i*}^1) \to opt$ при заданных ограничениях на технические характеристики ресурса, $\phi(x_i^1) \geq 0$. Варианты моделей выбора представлены, например, в работах (Amin, Razmi, 2009; Amin, Zhang, 2012; Mendoza, Ventura, 2011; Mendoza, Ventura, 2012; Moosavi, Ebrahimnejad, 2017). В этих статьях переменная y_{i*}^1 рассматривается как часть совокупности коммерческих характеристик, и обычно это цена. Решается задача скалярной оптимизации, в соответствии с которой предложения производителей на множестве ресурсов формируют допустимые по необходимым для потребителя техническим характеристикам подмножества, на которых выбирается наиболее эффективный производитель по коммерческому критерию.

В статье предлагается переход к многокритериальной оптимизации, направленной на выбор таких подмножеств $(x^2; y^2)$ на множестве V^2, характеристики которых максимально соответствуют коммерческим требованиям $(x^1; y^1)$ и техническим требованиям $(x^3; y^3)$. Многокритериальная оптимизация позволит получить более эффективное решение. Для этого необходимо разработать модель задачи многокритериального выбора в условиях централизованной схемы закупок.

1. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СХЕМЫ ЗАКУПОК

Для формирования модели многокритериального выбора целесообразно использовать централизованную схему закупок с единой системой выбора производителей и распределением выбранных ресурсов по потребителям, позволяющую получать оптимальных производителей одновременно для всех потребителей. В такой схеме на вход системы закупок поступают заявки от потребителей ресурса с описанием допустимых значений определенного состава технических характеристик и необходимого количества ресурса. Все заявки централизованно собираются в единый закупочный пул, представленный объединением допустимых значений технических характеристик, а также коммерческих характеристик, определяемых централизованным закупщиком.

Производители формируют некоторое количество предлагаемых ресурсов с указанием их конкретных технических и коммерческих характеристик, аналогичных по составу характеристикам закупочного пула.

Принцип решения поставленной задачи основан на парных сравнениях значений характеристик спроса и предложения, максимизации их соответствия по аналогии с работами (Roth, Rothblum, 1977; Roth, 2003; Будяков, Гетманова, Матвеев, 2017, с. 26–34) на основе анализа пересечений подмножеств предложения производителей $(x^1; y^1)$ и спроса потребителей $(x^3; y^3)$. Анализ сводится к матчингу (парному выбору) характеристик и вычислению степени их соответствия. В этом случае скалярный экономический критерий заменяется на многокритериальные векторы соответствий технических и коммерческих характеристик. При заданном количестве закупок

должны выбираться такие ресурсы $v^2 \in V^2$, которые обеспечат максимальное соответствие по коммерческим и техническим требованиям.

Для осуществления многокритериального выбора необходимо построить математическую модель, предварительно выполнив формализацию ее параметров.

2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

Наличие множества типов однородных, взаимозаменяемых ресурсов обуславливает задание технических и коммерческих характеристик спроса в виде интервальных значений с дифференциацией предпочтений каждого значения. Таким образом, особенностью предлагаемой формализации будет построение функции, отображающей степень предпочтения, для каждого интервала. Наиболее удобным формальным языком для описания таких требований является язык нечетких множеств (Матвеев, 2021, с. 105–112).

Полагаем, что потребители и централизованный закупщик задают требования к ресурсам в виде векторов $\tilde{x}^3; \tilde{y}^3$, компонентами которых служат нечеткие переменные. Каждая нечеткая переменная $\tilde{x}_l^3$ и $\tilde{y}_s^3$ ($l = 1, \ldots, p$; $s = 1, \ldots, r$) имеет кусочно-линейные функции принадлежности $f(\tilde{x}_l^3) \in [0;1]$ и $f(\tilde{y}_s^3) \in [0;1]$, носители которых отражают возможные допустимые диапазоны значений характеристик, а значения функции — их предпочтения. Для дискретных значений носителя функция принадлежности будет иметь табличный вид.

Множество типов однородного ресурса j из V^2 будем описывать векторами технических и коммерческих характеристик: $x_j = (x_j^1; \ldots; x_j^p)$ и $y_j = (y_j^1; \ldots; y_j^r)$, $j = 1, \ldots, m$.

Степень удовлетворения предложения спросу по каждой характеристике будем называть локальным соответствием. Мера локального соответствия пары «ресурс v_j^2 — потребитель v_k^3» по технической характеристике l вычисляется путем подстановки четкого значения координаты l вектора x_j в функцию принадлежности $f(\tilde{x}_l^3)$. Обозначим такую меру через $\mu_{jk}^l \in [0;1]$, $l = 1, \ldots, p$. Мера локального соответствия пары «поставщик v_i^1 — ресурс v_j^2» по коммерческой характеристике s определяется путем подстановки четкого значения координаты вектора y_j в функцию принадлежности $f(\tilde{y}_s^3)$. Обозначим эту меру через $\eta_{ij}^s \in [0;1]$, $s = 1, \ldots, r$.

При распределении ресурсов от производителей к потребителям необходимо принимать во внимание, что характеристики могут быть неравнозначными при принятии решения — какие-то могут оказывать большее влияние на выбор определенного ресурса, другие быть менее значимыми. В этом случае можно, например, экспертным путем назначить веса соответствий по каждой характеристике, которые будем обозначать $\phi(x_l^3)$, $\varphi(\tilde{K}_j^2)$ или $\varphi(\tilde{K}_j^1)$, $l = 1, \ldots, p$; $s = 1, \ldots, r$.

Следующей задачей, которую необходимо решить для формирования оптимальных отношений между элементами множеств V^1, V^2 и V^3, является определение агрегированной по всем характеристикам степени соответствия требованиям с учетом неравнозначности каждого критерия

$$\mu_{jk} = \mathrm{agr}\{\mu_{jk}^l\},\ \eta_{ij} = \mathrm{agr}\{\eta_{ij}^s\}, \tag{1}$$

где agr — оператор агрегирования.

Оператором агрегирования называют функцию от N переменных (критериев) $\mathrm{agr}: \bigcup_{n \in N} [0,1]^n \to [0,1]$, удовлетворяющую ряду обязательных условий (Yager, 1988; Леденева, Подвальный, 2016) на множестве произвольных $x, y \in [0;1]$:

1) $\mathrm{agr}(x) = x$;

2) $\mathrm{agr}(0, \ldots, 0) = 0$ и $\mathrm{agr}(1, \ldots, 1) = 1$;

3) $\mathrm{agr}(x_1, \ldots, x_N) \le \mathrm{agr}(y_1, \ldots, y_N)$, если $(x_1, \ldots, x_N) \le (y_1, \ldots, y_N)$.

Оператор агрегирования также может обладать рядом дополнительных свойств в зависимости от области применения, которые описаны в (Detyniecki, 2000). Поскольку в нашем случае переменными оператора агрегирования являются технические и коммерческие характеристики, то важно выполнение следующих свойств. Во-первых, необходимо учитывать, что полное локальное несоответствие хотя бы по одному параметру ($\mu_{jk}^l = 0$ или $\eta_{ij}^s = 0$) влечет полное

агрегированное несоответствие. Также полное агрегированное соответствие ($\mu_{jk}=1$ или $\eta_{ij}=1$) может достигаться только при полном локальном соответствии по всем характеристическим параметрам ($\mu^{l}_{jk}=1,\ l=1,\dots,p$ или $\eta^{s}_{ij}=1,\ s=1,\dots,r$). Кроме того, необходимо учитывать взаимодействие характеристик между собой. Некоторые характеристики при объединении могут усилить влияние друг друга на процесс принятия решения, а другие, наоборот, ослабить. Это свойство в (Detyniecki, 2000) описано как «усиление» (reinforcement). В результате может не выполняться свойство аддитивности весов характеристик при объединении последних. Если, например, характеристики неравнозначны при выборе поставщика и ресурса и каждой был назначен вес $\phi(x_l)$ или $\phi(y_s)$, то вес совокупности двух критериев (например, $\phi(x_{l1}\cup x_{l2})\neq\phi(x_{l1})+\phi(x_{l2})$) может быть как больше, так и меньше ($\phi(x_{l1})+\phi(x_{l2})$). Аналогично, это может наблюдаться при объединении большего числа характеристик. Еще одно естественное свойство — это «компенсирующее» свойство, заключающееся в том, что $\min\limits_{i=1,\dots,N}(x_i)\le \mathrm{agr}(x_1,\dots,x_N)\le \max\limits_{i=1,\dots,N}(x_i)$.

В качестве оператора агрегирования предлагается дискретный интеграл Шоке по нечеткой мере (Detyniecki, 2000; Матвеев, 2021), который применяется, когда на результат агрегирования влияет величина каждого из критериев (характеристик) и удовлетворяет всем перечисленным выше свойствам, в том числе позволяет учитывать взаимодействие критериев друг с другом. Последнее возможно благодаря тому, что вычисление интеграла Шоке основано на λ-нечеткой мере Сугено, которая выражает субъективный вес или значимость каждого подмножества критериев и определяется следующим образом (Ягер, 1986; Нечеткие множества..., 1986):

$$\phi\left(\left\{x_j, j\in M^1\right\}\right)=\left[\prod_{j\in M}\left(1+\lambda\phi_j\right)-1\right]/\lambda,\quad M^1\subseteq M, \tag{2}$$

где ϕ_j — коэффициенты важности (веса) отдельно взятых частных показателей эффективности при построении обобщенного показателя, в нашем случае — это веса технических или коммерческих характеристик; M — множество индексов характеристик. В (Нечеткие множества..., 1986) приводится уравнение, из которого можно найти единственное значение параметра λ:

$$\lambda+1-\prod_{j\in M}\left(1+\lambda\phi_j\right)=0, \tag{3}$$

удовлетворяющего условиям $\lambda>-1,\ \lambda\neq 0$. Тогда интеграл Шоке для нахождения агрегированного соответствия μ_{jk} рассчитывается по формуле

$$\mu_{jk}=\mathrm{agr}\left(\mu^1_{jk},\dots,\mu^p_{jk}\right)=\begin{cases}\sum\limits_{l=1}^{p}\left(\mu^{(l)}_{jk}-\mu^{(l-1)}_{jk}\right)\phi\left(X/f(x)\ge\mu^{(l)}_{jk}\right)\forall\mu^{(l)}_{jk}\neq 0,\\ 0-\text{в противном случае},\end{cases} \tag{4}$$

где $\mu^{(1)}_{jk},\dots,\mu^{(p)}_{jk}$ — перестановка элементов $\mu^1_{jk},\dots,\mu^p_{jk}$ такая, что $\mu^{(1)}_{jk}\le\mu^{(2)}_{jk}\le\dots\le\mu^{(p)}_{jk}$, $\mu^{(0)}_{jk}=0$; X — подмножество множества технических характеристик, $x\in X$.

Нахождение агрегированных соответствий η_{ij} происходит аналогично:

$$\eta_{ij}=\mathrm{agr}\left(\eta^1_{ij},\dots,\eta^r_{ij}\right)=\begin{cases}\sum\limits_{s=1}^{r}\left(\eta^{(s)}_{ij}-\eta^{(s-1)}_{ij}\right)\phi\left(X/f(x)\ge\eta^{(s)}_{ij}\right)\forall\eta^{(s)}_{ij}\neq 0,\\ 0-\text{в противном случае}.\end{cases} \tag{5}$$

Таким образом, получаем две матрицы агрегированных соответствий ресурсов по техническим характеристикам $(\mu_{jk})_{j=1,\dots,n;k=1,\dots,d}$ и производителей по коммерческим характеристикам $(\eta_{ij})_{i=1,\dots,m;j=1,\dots,n}$.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

Пусть заданы ограничения на количество ресурсов у производителей и потребности в ресурсе у потребителей. Тогда задача многокритериального выбора, обозначенная в разд. 1, может быть представлена в виде транспортной задачи с промежуточными пунктами (Таха, 2001), где целевыми коэффициентами будут элементы матриц агрегированных соответствий — μ_{jk} и η_{ij}.

Обозначим через u_{ij} количество ресурсов типа j, которые поступают от производителя i, через υ_{jk} — число ресурсов типа j, назначенных потребителю k. Математическая модель транспортной задачи для оптимального распределения ресурсов от производителей по потребителям примет вид:

$$a\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\eta_{ij}u_{ij}+(1-a)\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{d}\mu_{jk}\upsilon_{jk}\to\max,$$
$$\begin{cases}\sum_{j=1}^{m}\upsilon_{jk}=\nu_k, \quad k=1,\dots,d,\\ \sum_{i=1}^{n}u_{ij}=\sum_{k=1}^{d}\upsilon_{jk}, \quad j=1,\dots,n,\\ u_{ij}\le w_{ij}, \quad i=1,\dots,m, j=1,\dots,n,\end{cases} \tag{6}$$
$$u_{ij},\upsilon_{jk}\in\{0,R^+\}, \quad i=1,\dots,m,\ j=1,\dots,n,\ k=1,\dots,d,$$

где w_{ij} — количество ресурса вида j у производителя i; v_k — потребности потребителя k в ресурсе; a — параметр, $a\in[0,\ 1]$. Чем ближе параметр a к 0, тем важнее при распределении ресурсов и выборе производителей технические требования, чем ближе к 1 — важнее коммерческие требования.

Первая совокупность ограничений модели (6) формализует условие, заключающееся в том, что количество однородных ресурсов, которые поступают от производителей, должно полностью удовлетворить потребности потребителя k $(k=1,\dots,d)$.

Вторая совокупность ограничений связана с тем, что суммарное количество однородного ресурса j, полученного от всех производителей, должно быть полностью распределено по потребителям.

Перед решением задачи (6) необходимо проверить дополнительное условие $\sum_{k=1}^{d}\nu_k\le\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}w_{ij}$, так как важно не допустить дефицита ресурсов.

4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

Рассмотрим упрощенную задачу выбора производителей однородного оборудования с последующим его распределением по потребителям, а в качестве ресурса — производственное оборудование. Будем считать, что три компании, являющиеся структурными единицами холдинга, подготовили в централизованную закупочную организацию свои заявки на насосы. В каждой заявке указаны технические требования к насосам, представленные компонентами нечеткого вектора $(\tilde{x}_{k1}^3,\dots,\tilde{x}_{k5}^3)$, $k=1,2,3$, и указано требуемое число насосов ν_k (табл. 1). Компоненты вектора заданы в виде нормированных нечетких чисел с треугольной функцией принадлежности:

$$f_{\tilde{x}_{kl}^3}(x)=\begin{cases}(x-a_{kl})/(m_{kl}-a_{kl}), \ x\in[a_{kl};m_{kl}],\\ (b_{kl}-x)/(b_{kl}-m_{kl}), \ x\in[m_{kl};b_{kl}],\\ 0-\text{в остальных случаях},\end{cases} \tag{7}$$

где a_{kl} — левая граница значений соответствующей компоненты нечеткого вектора, b_{kl} — правая граница, m_{kl} — мода, $l=1,\dots,5$. Значения функции принадлежности определяют степень соответствия значения характеристики требованиям заявки.

Закупочная организация предъявляет к производителям коммерческие требования $(\tilde{y}_1^3,\tilde{y}_2^3)$ (табл. 2). Компоненты вектора коммерческих требований заданы также в виде нечетких чисел с треугольной функцией принадлежности:

$$f_{\tilde{y}_s^3}(x)=\begin{cases}(x-a_s)/(m_s-a_s), \quad x\in[a_{kl};m_{kl}],\\ (b_s-x)/(b_s-m_s), \quad x\in[m_{kl};b_{kl}],\\ 0-\text{в остальных случаях},\end{cases} \tag{8}$$

где a_s — левая граница значений соответствующей компоненты нечеткого вектора, b_s — правая граница, m_s — мода. Типы насосов с конкретными значениями технических характеристик приведены в табл. 3. Наличие насосов у разных поставщиков показано в табл. 4.

Таблица 1. Технические требования к насосам

Параметр функции принадлежности	Расход, $м^3/ч$	Напор, м	Частота вращения, об./мин.	Мощность электродвигателя, КВт	Масса, кг	Число насосов, ν_k
Заявка 1						5
a_{1l}	420	30	1000	55	1750	
m_{1l}	630	90	1300	315	2000	
b_{1l}	630	90	1500	315	2760	
Заявка 2						7
a_{2l}	520	50	1100	150	1500	
m_{2l}	750	80	1500	280	1800	
b_{2l}	750	90	1750	300	2500	
Заявка 3						4
a_{3l}	500	70	1000	200	2000	
m_{3l}	600	100	1200	280	2350	
b_{3l}	650	120	1300	300	2500	

Таблица 2. Коммерческие требования к насосам

Параметры функции принадлежности	Цена, у.е., $\tilde{y}_1^3$	Срок поставки, дни, $\tilde{y}_2^3$
a_s	500	70
m_s	600	100
b_s	650	120

Таблица 3. Технические характеристики типов насосов

Тип насоса	Расход, $м^3/ч$	Напор, м	Частота вращения, об/мин.	Мощность электродвигателя, КВт	Масса, кг
1	550	82	1200	270	2400
2	620	85	1250	210	2490
3	600	80	1280	220	2100

Таблица 4. Число насосов у производителей

Насос, j	Производители, i			Итого
	1	2	3	
1	2	4	6	12
2	7	0	3	10
3	5	4	2	11
Итого	14	8	11	33

Следовательно, предлагается 33 взаимозаменяемых насоса, а потребителям надо 16, максимально соответствующих техническим и коммерческим требованиям. В табл. 5 указаны цены на насосы и сроки, в которые поставщики могут их поставить.

Локальные соответствия насосов по 5 техническим и по 2 коммерческим требованиям легко найти, подставив значения технических и коммерческих характеристик из табл. 3 и 5 в функции (7) и (8) соответственно. Параметры функций (7) и (8) определяются из табл. 1 и 2. Например, локальные соответствия насосов техническим требованиям заявки № 1 (μ_{j1}^l, $l = 1, \ldots, 5$) приведены в табл. 6.

Вычисление агрегированных соответствий $(\mu_{jk})_{j=1,2,3;k=1,2,3}$ и $(\eta_{ij})_{i=1,2,3;j=1,2,3}$ производится с помощью интеграла Шоке по формулам (4) и (5) соответственно.

Предположим, что технические критерии неравнозначны для принятия решения о выборе насоса. Пусть эксперт назначил следующие весовые коэффициенты важности каждого критерия: $\phi_1 = 0,2$, $\phi_2 = 0,7$, $\phi_3 = 0,68$, $\phi_4 = 0,4$, $\phi_5 = 0,1$.

Агрегирование с помощью интеграла Шоке по техническим характеристикам подробно рассмотрим на примере насоса 1. Упорядочим технические характеристики насоса 1 по мере возрастания

Таблица 5. Коммерческие характеристики насосов

Производитель	Насос					
	1		2		3	
	Цена	Срок поставки	Цена	Срок поставки	Цена	Срок поставки
1	510	90	600	80	660	130
2	580	75	515	140	620	90
3	540	110	542	100	580	110

Таблица 6. Локальные соответствия насосов техническим требованиям заявки № 1

Заявка	Расход, м^3/ч	Напор, м	Частота вращения, об./мин.	Мощность электродвигателя, КВт	Масса, кг
Насос 1, $j = 1$	0,619	0,867	0,667	0,827	0,474
Насос 2, $j = 2$	0,952	0,917	0,833	0,596	0,355
Насос 3, $j = 3$	0,857	0,833	0,933	0,635	0,868

их локального соответствия соответствующим требованиям (см. строку для насоса 1 в табл. 6). Результаты упорядочивания приведены в табл. 7.

Технические характеристики по возрастанию значений локальных соответствий приведены в табл. 8. Для нахождения параметра λ для λ-меры Сугено было решено уравнение (2) (с учетом $\lambda > -1$, $\lambda \neq 0$):

$$\lambda + 1 - (1 + 0,2\lambda)(1 + 0,7\lambda)(1 + 0,68\lambda)(1 + 0,4\lambda)(1 + 0,1\lambda) = 0$$

и найден корень $\lambda = -0,945$. В соответствии с правилом (1) рассчитаны значения нечеткой меры, записанные в последней строке табл. 8. Например, значения нечеткой меры

$$\phi(X / f(x) \geq 0,474) = \phi(1,...,5) = [(1 - 0,945 \times 0,2)...(1 + 0,945 \times 0,1) - 1] / (-0,945) = 1,$$

$$\phi(X / f(x) \geq 0,619) = \phi(1,...,4) =$$

$$= [(1 - 0,945 \times 0,2)(1 - 0,945 \times 0,7)... \times (1 - 0,945 \times 0,4) - 1] / (-0,945) = 0,994,$$

и т.д. Тогда агрегированное соответствие первого насоса заявке № 1 по техническим характеристикам:

$$\mu_{11} = \mu_{11}^5 \phi(1,...,5) + (\mu_{11}^1 - \mu_{11}^5)\phi(1,...,4) + (\mu_{11}^3 - \mu_{11}^1)\phi(2,3,4) + (\mu_{11}^4 - \mu_{11}^3)\phi(4,2) + (\mu_{11}^2 - \mu_{11}^4)\phi(2) =$$

$$= 0,474 \times 1 + (0,619 - 0,474) \times 0.994 + (0,667 - 0,619) \times 0.979 +$$

$$+ (0,827 - 0,667) \times 0.836 + (0,867 - 0,827) \times 0,700 = 0,827.$$

Значения остальных элементов матрицы $(\mu_{jk})_{j=1,2,3;k=1,2,3}$ приведены в табл. 9, значения элементов матрицы $(\eta_{ij})_{j=1,2,3;k=1,2,3}$ — в табл. 10.

Таблица 7. Упорядоченные по локальным соответствиям технические характеристики насоса 1

Характеристика	№ характеристики				
	1	2	3	4	5
Ранги критериев по локальным соответствиям	4	1	3	2	5
Локальные соответствия	0,619	0,867	0,667	0,827	0,474

Таблица 8. Значения меры Сугено

Характеристика	№ характеристики, l				
	5	1	3	4	2
Локальные соответствия, $\mu_{11}^{(l)}$	0,474	0,619	0,667	0,827	0,867
Веса критериев, ϕ_l	0,1	0,2	0,68	0,4	0,7
$\phi(X / f(x) \geq \mu_{jk}^{(l)})$	$\varphi(1,...,5) = 1$	$\varphi(1,...,4) = 0,994$	$\varphi(2, 3, 4) = 0,979$	$\varphi(4, 2) = 0,836$	$\varphi(2) = 0,700$

Таблица 9. Значения интеграла Шоке по техническим характеристикам

μ_{jk}	Заявка, k		
Насос, j	1	2	3
1	0,826	0,756	0,886
2	0,892	0,475	0,503
3	0,897	0,849	0,443

Таблица 10. Значения интеграла Шоке по коммерческим характеристикам (вес первого критерия 0,8, второго 0,4)

η_{ij}	Производитель, i		
Насос, j	1	2	3
1	0,327	0,420	0,440
2	0,867	0	0,652
3	0	0,627	0,740

Теперь можно переходить к решению транспортной задачи (6). Математическая модель задачи имеет вид:

$$\begin{gathered} a\left(0,327u_{11}+0,867u_{12}+0,42u_{21}+0,627u_{23}+0,44u_{31}+0,652u_{32}+0,74u_{33}\right)+ \\ +\left(1-a\right)\left(0,826\upsilon_{11}+0,756\upsilon_{12}+0,886\upsilon_{13}+0,892\upsilon_{21}+0,475\upsilon_{22}+0,503\upsilon_{23}+\right. \\ \left.+0,897\upsilon_{31}+0,849\upsilon_{32}+0,443\upsilon_{33}\right)\to \max, \end{gathered} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \upsilon_{11}+\upsilon_{21}+\upsilon_{31}=5, \\ \upsilon_{12}+\upsilon_{22}+\upsilon_{32}=7, \\ \upsilon_{13}+\upsilon_{23}+\upsilon_{33}=4, \\ u_{11}+u_{21}+u_{31}=\upsilon_{11}+\upsilon_{12}+\upsilon_{13}, \\ u_{12}+u_{22}+u_{32}=\upsilon_{21}+\upsilon_{22}+\upsilon_{23}, \\ u_{13}+u_{23}+u_{33}=\upsilon_{31}+\upsilon_{32}+\upsilon_{33}, \\ u_{11}\le 2,\quad u_{21}\le 4,\quad u_{31}\le 6, \\ u_{12}\le 7,\quad u_{22}=0\ ,\quad u_{32}\le 3, \\ u_{13}\le 5,\quad u_{23}\le 4,\quad u_{33}\le 2, \end{cases}$$

$$u_{ij},\upsilon_{jk}\in\left\{0,Z^{+}\right\},\quad i=1,2,3;\quad j=1,2,3,\quad k=1,2,3.$$

Решение данной задачи при a=0,5 представлено в табл. 11. Решение показало, что у выбранных поставщиков были произведены закупки насосов с максимально достижимым соответствием коммерческим требованиям и все заявки были удовлетворены с максимально достижимым соответствием техническим требованиям. Отклонение от полученной схемы закупок приведет к снижению значения критерия (6), отображающего агрегированное соответствие коммерческих и технических требований.

Таблица 11. Оптимальное распределение насосов при a = 0,5

Производитель, i	Закупили у производителей			Сумма	Тип насосов, j	Получили потребители			Сумма
	1	2	3			1	2	3	
	Неизвестные, u_{ij}					Неизвестные, υ_{jk}			
1	0	0	0	**0**	1	1	2	4	**7**
2	7	0	3	**10**	2	4	0	0	**4**
3	0	4	2	**6**	3	0	5	0	**5**
Сумма	**7**	**4**	**5**		Сумма	**5**	**7**	**4**	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитии технологий закупок можно указать два перспективных направления: реализация централизованных закупок, осуществляемая на основе положений 44-ФЗ (Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ (редакция от 09.03.2016)), и переход к «обезличенным», параметрическим закупкам (Караев, Москвитина, Будяков, 2015). Обе технологии, наряду с известными достоинствами (Мягких, Гриненко, 2017), характеризуются завышенными трудовыми и временными затратами. Снижение этих затрат одновременно с повышением качества закупок достигается путем цифровой трансформации, максимальной автоматизации процессов закупки. Цифровая трансформация и автоматизация включают: поддержку принятия решений, применение блокчейн, смарт-контрактов, управление жизненным циклом контракта, искусственный интеллект в сфере закупок и роботизация процессов с целью перевода рутинной работы в закупочных процессах от людей программам (Автоматизация закупок..., 2019). Предложенные в нашей статье модели и алгоритмы могут рассматриваться как теоретическая основа реализации одного из возможных вариантов цифровой трансформации процессов систем корпоративных и государственных закупок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Автоматизация закупок: опыт крупнейших заказчиков, структура рынка, тренды. Исследование_TAdviser (2019). Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/ [*Automation of purchases: Experience of the largest customers, market structure, trends*. Study_TAdviser (2019). Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/ (in Russian).]

Будяков А.Н., Гетманова К.Г., Матвеев М.Г. (2017). Решение задачи выбора ресурсов и их поставщиков в условиях противоречивости технических и коммерческих требований // *Вестник Воронежского государственного университета, серия: Системный анализ и информационные технологии*. № 3. С. 26–34. [**Budyakov A.N., Getmanova K.G., Matveev M.G.** (2017). Resources and their suppliers selection problem solving within contradictory technical and commercial requirements. *Bulletin of the Voronezh State University, series System Analysis and Information Technologies*, 2, 66 (in Russian).]

Караев А.Э., Москвитина И.В., Будяков А.Н. (2015). Использование методики планирования по обезличенным МТР при закупках и поставках комплектного оборудования для крупных проектов нефтяной отрасли // *Нефть России*. № 10. С. 52–53. [**Carayev A.E., Moscvitina I.V., Budyakov A.N.** (2015). The use of a planning method for impersonal material and technical resources in the procurement and supply of complete equipment for large projects in the oil industry. *Oil of Russia,* 10, 52–53 (in Russian).]

Леденева Т.М., Подвальный С.Л. (2016). Агрегирование информации в оценочных системах // *Вестник Воронежского государственного университета, серия: Системный анализ и информационные технологии*. № 4. С. 155–164. [**Ledeneva T.M., Podvalniy S.L.** (2016). The aggregation of information in the evaluation system. *Bulletin of the Voronezh State University, series System analysis and information technologies*, 4, 155–164 (in Russian).]

Матвеев М.Г. (2021). Информационные технологии формирования предложения на электронной торговой площадке с технологией «маркетплейс» // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 1. С. 105–112. [**Matveev M.G.** (2021). Information technologies for supply creation on e-trading platform with marketplace technology. *Economics and Mathematical Methods*, 57, 1, 105–112 (in Russian).]

Мягких Н.Ю., Гриненко С.В. (2017). Механизм централизации системы государственных закупок // *Научное обозрение. Экономические науки*. № 3. С. 69–72. [**Myagkikh N.Y., Grinenko S.V.** (2017). Mechanism of centralization of system of public procurements. *Scientific Review. Economic Sciences*, 3, 69–72 (in Russian).]

Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта (1986). Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. [*Fuzzy sets in models of control and artificial intelligence* (1986). D.A. Pospelov (Ed.). Moscow: Nauka (in Russian).]

Таха Х.А. (2001). Введение в исследование операций. М.: Издательский дом «Вильямс». [**Taha H.A.** (2001). *Introduction to operations research*. Moscow: Williams Publishing House (in Russian).]

Ягер Р. (ред.) (1986). Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь. [**Yager R.** (ed.) (1986). *Fuzzy sets and possibility theory. Resent developments.* Moscow: Radio i svjaz'. Originally published by New York, Oxford, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press.]

Amin S.H., Razmi J. (2009). An integrated fuzzy model for supplier management: A case study of ISP selection and evaluation. *Expert Systems with Applications*, 36, 4, 8639–8648.

Amin S.H., Zhang G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 39, 8, 6782–6791.

Detyniecki M. (2000). *Mathematical aggregation operators and their application to video querying*. Ph.D. dissertation, University of Paris VI, Paris, France.

Mendoza A., Ventura J.A. (2012). Analytical models for supplier selection and order quantity allocation. *Applied Mathematical Modelling*, 36, 8, 3826–3835.

Mendoza F., Ventura J.A. (2011). Modeling actual transportation costs in supplier selection and order quantity allocation decisions. *Operational Research*, 13, 1, 5–25.

Moosavi S.A., Ebrahimnejad S. (2017). A new multi-objective mathematical model for supplier selection in uncertain environment. *13th International Conference on Industrial Engineering (IIEC2017)*.

Roth A.E. (2003). The origins, history, and design of the resident match. *Jama*, 289, 7, 909.

Roth A.E., Rothblum U.G. (1999). Truncation strategies in matching markets — in search of advice for participants. *Econometrica*, 67, 1, 21–43.

Yager R.R. (1988). Ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making // *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 18, 183–190.

Digital technology of centralized procurement organization

© 2022 N.A. Aleynikova, M.G. Matveev

N.A. Aleynikova,
Voronezh State University, Voronezh, Russia; e-mail: balbashovan@mail.ru

M.G. Matveev,
Voronezh State University, Voronezh, Russia; e-mail: mgmatveev@yandex.ru

Received 10.08.2021

Abstract. The article is devoted to the development of models framework for digital transformation of processes in corporate and public procurement systems. In particular, the solution of the problem of multicriteria choice in economic systems described by the three-part graph "producer — resource — consumer" is considered. A mathematical model for the optimal distribution of a homogeneous resource from suppliers to consumers in a centralized procurement system is proposed. This model is reduced to a transport problem with intermediate points. Optimization is aimed at achieving maximum compliance in terms of the totality of technical and commercial characteristics of a homogeneous resource. To set the requirements for these characteristics on the part of the consumer, it is proposed to use fuzzy variables. This provides the consumer with a flexible mechanism for describing resource requirements based on his preferences. An operator of aggregation of local correspondences concerning a set of characteristics is proposed in the form of a discrete Choquet integral with a fuzzy measure. Using the example of production equipment, it is shown how it is possible to formalize the parameters of the model, and then to optimize and automate the process of distributing equipment by solving a transport problem with intermediate points in such a way, that the maximum correspondence in its characteristics is achieved. The developed models and algorithms can be used to create information services on electronic trading platforms, including the of public procurement.

Keywords: digital transformation; centralized procurement system; homogeneous resource; linguistic and fuzzy variables; aggregation; Choquet integral; fuzzy measure; multi-criteria choice; transport problem with intermediate points.

JEL Classification: M15.

Quoting: **Aleynikova N.A., Matveev M.G.** (2022). Digital technology of centralized procurement organization. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 70–79. DOI: 10.31857/S042473880018980-7

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 80–91

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Кластерный анализ и классификация промышленно ориентированных регионов РФ по экономической специализации

© 2022 г. О.М. Шаталова, Е.В. Касаткина, В.Н. Лившиц

О.М. Шаталова,
Удмуртский филиал Института экономики УрО РАН, Ижевск; e-mail: oshatalova@mail.ru

Е.В. Касаткина,
Ижевский государственный техн*ический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск; e-mail: e.v.trushkova@gmail.com*

В.Н. Лившиц,
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва; e-mail: livchits@isa.ru

Поступила в редакцию 14.09.2021

Статья подготовлена в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук и планом НИР Института экономики Уральского отделения РАН на 2021–2023 гг. по теме «Методология инновационного развития регионально-ориентированных систем в условиях нестабильной экономической конъюнктуры».

Аннотация. Статья посвящена вопросам организации промышленного сектора в пространственном развитии национальной экономики. Цель исследования состояла в классификации промышленно ориентированных регионов РФ по характеру их экономической специализации и развития необходимых для этого экономико-математических методов. В условиях высокой социально-экономической дифференциации субъектов РФ исследовательские задачи их классификации приобретают высокую актуальность, поскольку способствуют выявлению однородных (по задаваемым признакам) групп регионов, каждой из которых присущи особые закономерности функционирования. Классификация промышленных регионов по критерию их экономической специализации была проведена с помощью интеллектуальных математических методов кластерного анализа. Для решения задачи был разработан адаптированный алгоритм кластеризации, основанный на использовании метода k-средних. Результатом кластеризации явилось разделение совокупности промышленных регионов на 12 классов, устойчивых по признаку экономической специализации, и их содержательная интерпретация, которая раскрывается следующими положениями: а) составлены описательные характеристики, идентифицирующие каждый класс регионов на основании концепции трехсекторной модели экономики (Фишера–Кларка) и результатов количественной оценки диверсификации экономики регионов; б) выраженная однородность регионов внутри кластеров позволила составить дифференцированную оценку социально-экономических показателей, учитывающую специфику экономики регионов в каждом классе. Полученные результаты позволили уточнить некоторые существенные закономерности, которые могут иметь значение для повышения эффективности государственного управления.

Ключевые слова: региональная экономика, устойчивое развитие, пространственное развитие, промышленно ориентированные регионы, экономическая специализация, диверсификация экономики региона, кластерный анализ, машинное обучение.

Классификация JEL: C38, O14, R11.

Цитирование: **Шаталова О.М., Касаткина Е.В., Лившиц В.Н.** (2022). Кластерный анализ и классификация промышленно ориентированных регионов РФ по экономической специализации // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 80–91. DOI: 10.31857/S042473880018971-7

ВВЕДЕНИЕ

Важной функцией государственной региональной политики выступает обеспечение устойчивого экономического развития регионов. В сложившихся условиях высокой межрегиональной социально-экономической дифференциации для реализации этой функции становятся необходимы научно-обоснованные методы классификации регионов. «Стратегия пространственного развития

РФ на период до 2025 года»[1] определила ряд задач, в решении которых необходимо учитывать специфику региональной экономики субъектов РФ, в том числе такое ее проявление, как *экономическая специализация* — совокупность отраслей, имеющих приоритетное значение для социально-экономического развития региона. Экономическая специализация субъектов РФ является существенной предпосылкой к обоснованной оценке их макроэкономических параметров и выявлению действенных приоритетов экономического развития как основаниям для формирования региональной, инновационной, промышленной политики государственного управления. Данное положение определяет необходимость классификации регионов по признаку их экономической специализации. Актуальность исследования *промышленно ориентированных регионов* РФ обусловлена тем, что промышленность играет центральную роль в экономике современного общества[2]. Индустриальный сектор экономики способствует повышению занятости, обеспечивает материальную основу повышения уровня жизни, служит базой для развития торговли и сельского хозяйства, стимулирует научно-исследовательскую и инновационную деятельность.

Представляется обоснованным классифицировать регионы средствами современных математических методов кластерного анализа, который направлен на многомерную обработку данных и оптимальное разбиение множества исследуемых объектов на однородные группы по значимым для исследования признакам. Назначение кластерного анализа — снижение размерности изучаемой совокупности объектов за счет их обоснованной классификации, что создает предпосылки к детализированному исследованию совокупности явлений для выявления актуальных причинно-следственных отношений и закономерностей (Айвазян и др., 1989).

В отечественных научных исследованиях регионы являются наиболее типичными объектами кластеризации и классификации данных по различным критериальным признакам: инновационное развитие (Голова, Суховей, 2019), качество жизни (Локосов, Рюмина, Ульянов, 2015), уровень человеческого капитала (Петрыкина, 2013; Локосов, Рюмина, Ульянов, 2019) и т.д. Большое значение для проводимого нами исследования имеют результаты кластеризации регионов РФ *по признаку структуры ВРП* в разрезе укрупненных ВЭД (Айвазян, Афанасьев, Кудров, 2016). Сложившиеся научные результаты показывают, что классификация регионов методами кластерного анализа способствует извлечению новых знаний о специфике региональной экономики в контексте решаемых научных и прикладных задач.

Цель нашего исследования состоит в классификации промышленно ориентированных регионов РФ по характеру их экономической специализации. Полученные результаты (выявленные методами кластерного анализа группы однородных по своей экономической специализации промышленных регионов РФ) будут способствовать, по нашему мнению, систематизации экономических исследований таких регионов, уточнению существенных закономерностей их функционирования и развития.

1. КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ В КЛАССИФИКАЦИИ ПРОМЫШЛЕННО ОРИЕНТИРОВАННЫХ РЕГИОНОВ РФ

Методика исследования и решения задачи классификации промышленно ориентированных регионов РФ по характеру их экономической специализации раскрывается в следующих основных положениях.

Совокупность промышленно ориентированных регионов РФ сформирована с учетом представленных в статье (Айвазян, Афанасьев, Кудров, 2016) результатов кластеризации, которые получены методом максимального правдоподобия на основе модели граничного производственного потенциала по вектор-характеристике структуры региональной экономики, включающей индекс промышленной специализации и индекс индустриализации. Результаты кластеризации позволили выделить группу регионов со специализацией в промышленности (по укрупненным, агрегированным ВЭД). При формировании совокупности промышленных регионов учитывалась региональная структура ВРП (по критерию превышения доли ВЭД, относимых к промышленному сектору, над

[1] «Стратегия пространственного развития РФ на период до 2025 года» (утв. Распоряжением Правительства РФ от 13.02.2019 № 207-р) (http://government.ru/docs/35733).

[2] «Наше общее будущее: доклад Всемирной комиссии по окружающей среде и развитию» (официальный отчет Генеральной Ассамблеи ООН, 1987) (https://www.un.org/ru/ga/pdf/brundtland.pdf).

среднероссийским значением). Кластерный анализ проводился на основании данных об объеме отгруженной продукции в разрезе отраслей промышленности (ВЭД второго уровня).

Для определения достаточного числа кластеризационных признаков, при которых не будет ярко выраженной мультиколлинеарности, была проанализирована зависимость доли объясненной дисперсии от числа признаков. По результатам такого анализа были исключены данные по тем ВЭД, которые очевидно несущественны для проводимого исследования.

Основным методом кластерного анализа явился метод k-средних. Этот метод принадлежит к группе итеративных методов эталонного типа (Охапкина, Охапкин, 2015). Сформированный в рамках исследования адаптированный алгоритм кластеризации, основанный на методе k-средних, включает интеллектуальную процедуру «k-means++» (Arthur, Vassilvitskii, 2007), которая обеспечивает решение проблемы чувствительности к выбору начального приближения и ускорение конвергенции задания центров кластеров, позволяет инициировать максимально дифференцированные друг от друга устойчивые центры кластеров и достигать высокой и выраженной отделимости кластеров. Необходимое для реализации метода k-средних число кластерных разбиений (K) было установлено на основании анализа зависимости целевой функции кластеризации от K, а также в ходе экспериментальных вычислительных процедур, направленных на проверку выполнимости условий компактности и отделимости формируемых кластеров.

Проверка устойчивости результатов кластеризации, полученных итерационным методом k-средних, проводилась в соответствии с эмпирическим правилом, согласно которому устойчивость решения доказывается при изменении методов (Олдендерфер, Блэшфилд, 1989). Для проверки был использован метод иерархического кластерного анализа.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Информационную основу исследования составили данные государственной статистики[3]. Предобработка данных включала оценку отраслевой структуры промышленного сектора и оценку уровня диверсификации экономики промышленных регионов.

Для оценки отраслевой структуры промышленного сектора регионов были использованы следующие исходные данные:

1) объем отгруженной продукции (ОП) по каждому ВЭД[4] $V_i^{(r)}$; для исследования приняты ВЭД (r), относимые к промышленности, в разрезе регионов (i); $r = 1, \ldots, m$, $i = 1, \ldots, N$, где m — число ВЭД, относимых к промышленности, $m = 4$, N — число входящих в выборку промышленных регионов (в соответствии с принятой методикой исследования $N = 40$);

2) структура объема ОП по каждому виду экономической деятельности[5] $y_{ij}^{(r)}$; показатель $y_{ij}^{(r)}$ представляет отношение объема ОП в отрасли j (V_{ij}) к объему ОП по соответствующему ВЭД ($V_i^{(r)}$):

$$y_{ij}^{(r)} = V_{ij} \Big/ V_i^{(r)}, \quad j = 1, \ldots, L,$$

где L — число кластеризационных признаков (отраслей промышленности); при $r = 1$ рассматриваются отрасли $j = 1, \ldots, 4$, при $r = 2$ — $j = 5, \ldots, 16$, при $r = 3$ — $j = 17, 18, 19$, при $r = 4$ — $j = 19, \ldots, 23$.

На основании данных по $V_i^{(r)}$ и $y_{ij}^{(r)}$ можно определить объем ОП отрасли j региона i V_{ij}: $V_{ij} = V_i^{(r)} y_{ij}^{(r)}$ и применить V_{ij} в расчете показателя «доля отрасли в объеме ОП по промышленности, в целом» x_{ij} (для характеристики отраслевой структуры промышленного сектора регионов):

$$x_{ij} = V_{ij} \Big/ \sum\nolimits_{r=1}^{m} V_i^{(r)}. \tag{1}$$

Для выявления существенных критериев кластеризации L был использован метод главных компонент. С помощью этого метода анализировалась зависимость доли объясненной дисперсии от числа принимаемых признаков; проведенный анализ показал, что 13 из 23 признаков позволяют объяснить 99,9% дисперсии. С учетом данного положения, при исследовании нами принято — в качестве критериев кластеризации — $L = 13$ отраслей промышленности, по которым формируется основной объем ОП для рассматриваемых регионов.

---

[3] «Регионы России. Социально-экономические показатели 2020» (https://gks.ru/bgd/regl/b20_14p/Main.htm).

[4] Раздел 13.1. «Объем ОП <...> по видам экономической деятельности» статистического сборника «Регионы России ...».

[5] Данные разделов 13.04, 13.05, 13.06, 013.07 статистического сборника «Регионы России...».

Недостаток информации в разделах 13.4, 13.5, 13.6, 13.7 статистического сборника «Регионы России. Социально-экономические показатели 2020» был компенсирован результатами регрессионного анализа. В качестве алгоритма регрессии применен метод Random Forests Regressor, поскольку он способен эффективно обрабатывать данные с большим числом признаков и может строить деревья по данным с пропущенными значениями признаков[6].

Оценка диверсификации основана на индексе Хиршмана–Херфиндаля (I_{HH}). Данный показатель признается применимым для региональных исследований (Михеева, 2013). Индекс рассчитывается по формуле $I_{HHi} = \sum_j x_{ij}^2$ и отражает степень доминирования отдельных отраслей в экономике региона. Высокое значение I_{HH} может свидетельствовать о выраженной специализации экономики региона, а низкое — о ее диверсификации. В оценке диверсификации необходимо учитывать, что в некоторых регионах сложились межотраслевые территориально-производственные комплексы (ТПК). Объемы производства по технологически смежным отраслям означают не диверсификацию экономики региона, а ее специализацию по соответствующему ТПК (Тимошенко, 2012). Данное положение было учтено через скорректированный расчет I_{HH} в регионах со сложившимися ТПК. Такой расчет проводился на основе объединения данных по смежным отраслям (выделены серым цветом в табл. 1).

Таблица 1. Результаты предварительной обработки данных для кластерного анализа промышленно ориентированных регионов РФ по характеру экономической специализации

i	Регион	Доля отраслей в объеме отгруженной продукции, %													I_{HH}
		$Д_1$	$Д_2$	$Д_3$	$Д_4$	$ОП_1$	$ОП_3$	$ОП_4$	$ОП_5$	$ОП_6$	$ОП_8$	$ОП_9$	$ОП_{10}$	$ОЭ_1$	
0	Белгородская область	0	0	19	0	43	0	1	1	3	23	1	1	2	0,28
1	Владимирская область	0	0	0	1	28	3	1	6	11	13	9	7	4	0,13
2	Калужская область	0	0	0	0	16	0	2	7	6	9	12	39	1	0,21
3	Курская область	0	0	29	0	28	0	3	5	7	1	5	3	14	0,19
4	Липецкая область	0	0	0	1	21	0	2	2	1	61	4	2	2	0,42
5	Смоленская область	0	0	0	1	10	9	1	9	11	11	8	7	17	0,09
6	Тульская область	0	0	0	1	17	0	4	2	17	37	4	3	5	0,20
7	Республика Карелия	0	0	31	6	7	9	25	0	1	3	0	2	6	0,23
8	Республика Коми	6	58	0	0	1	5	9	9	0	4	0	0	4	0,36
9	Ненецкий АО	0	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,96
10	Архангельская область без АО	0	0	7	6	5	15	33	0	2	3	1	11	7	0,26
11	Вологодская область	0	0	0	0	7	5	1	2	19	55	0	2	3	0,35
12	Ленинградская область	0	0	0	1	17	2	8	24	7	4	3	12	11	0,13
13	Новгородская область	0	0	0	1	16	10	6	1	32	2	4	3	5	0,15
14	Астраханская область	0	75	0	1	2	0	0	10	1	0	0	2	4	0,73
15	Волгоградская область	0	6	0	0	7	0	0	47	6	17	0	3	5	0,34
16	Республика Башкортостан	0	14	2	1	5	1	1	36	13	3	2	10	4	0,41
17	Республика Марий Эл	0	0	0	0	28	2	7	12	2	9	18	9	4	0,15
18	Республика Татарстан	0	25	0	0	7	1	1	26	11	4	3	13	3	0,41
19	Удмуртская Республика	0	36	0	0	9	2	1	1	1	19	9	14	3	0,20
20	Пермский край	0	23	0	1	4	1	3	24	19	5	3	5	6	0,45
21	Нижегородская область	0	0	0	0	8	1	2	27	8	16	4	21	4	0,16
22	Оренбургская область	0	55	3	1	5	0	0	10	1	13	0	1	5	0,34
23	Самарская область	0	22	0	0	9	0	0	6	12	7	3	29	5	0,17
24	Саратовская область	0	6	0	1	17	0	1	5	16	9	6	13	15	0,11
25	Свердловская область	0	0	3	1	6	1	0	2	4	52	4	10	8	0,30
26	Ханты-Мансийский АО	0	80	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	4	0,87
27	Ямало-Ненецкий АО	0	86	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	1	0,94
28	Тюменская область без АО	0	25	0	0	4	0	0	33	20	3	1	2	4	0,61
29	Челябинская область	0	0	4	1	8	0	0	2	3	53	2	9	5	0,30
30	Республика Хакасия	26	0	5	1	5	0	0	0	1	32	1	1	20	0,54

[6] Машинное обучение на Python (https://scikit-learn.org).

Окончание таблицы 1

i	Регион	Доля отраслей в объеме отгруженной продукции, %													I_{HH}
		$Д_1$	$Д_2$	$Д_3$	$Д_4$	$ОП_1$	$ОП_3$	$ОП_4$	$ОП_5$	$ОП_6$	$ОП_8$	$ОП_9$	$ОП_{10}$	$ОЭ_1$	
31	Красноярский край	1	27	3	0	2	2	0	1	2	49	0	1	5	0,32
32	Иркутская область	1	39	9	0	4	5	5	3	5	10	1	4	8	0,19
33	Кемеровская область	55	0	0	0	3	0	0	9	5	16	0	2	4	0,57
34	Омская область	0	0	0	0	9	0	0	69	6	2	2	3	2	0,49
35	Томская область	0	45	0	0	9	4	1	9	7	3	9	1	4	0,24
36	Республика Саха (Якутия)	8	46	12	22	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0,28
37	Магаданская область	1	0	14	1	1	0	0	0	1	73	0	0	6	0,76
38	Сахалинская область	4	87	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	1	0,76
39	Чукотский АО	3	0	13	0	2	0	0	0	0	71	0	0	5	0,71

Условные обозначения: $Д_1$ — добыча угля; $Д_2$ — добыча нефти и природного газа; $Д_3$ — добыча металлических руд; $Д_4$ — добыча прочих полезных ископаемых; $ОП_1$ — производство пищевых продуктов <...>; $ОП_3$ — обработка древесины и производство изделий из дерева <...>; $ОП_4$ — производство бумаги и бумажных изделий <...>; $ОП_5$ — производство кокса и нефтепродуктов <...>; $ОП_6$ — производство химических веществ и химических продуктов <...>; $ОП_8$ — производство металлургическое <...>; $ОП_9$ — производство компьютеров, электронных и оптических изделий; производство электрического оборудования; $ОП_{10}$ — производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки <...>; $ОЭ_1$ — производство, передача и распределение электроэнергии.

Источник: расчеты авторов.

В ходе кластерного анализа решалась задача разбиения множества промышленных регионов $X = \{x_i\}_{i=1,\dots,N}$, определяемых вектором категориальных признаков $x_i = (x_{ij}) = (x_{i1},\dots,x_{iL})$, на кластеры таким образом, чтобы суммарное отклонение регионов кластеров от центров кластеров F (внутриклассовое расстояние) было минимальным. То есть целевая функция кластеризации может быть представлена:

$$F = \sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}\left\|x_i^k - \mu^k\right\| \to \min, \tag{2}$$

где $\mu^k = (\mu_1^k,\dots,\mu_L^k)$ — центр кластера k; x_i^k — регион i, входящий в кластер k; n_k — число регионов, входящих в кластер k. В качестве расстояния $\rho(x_i^k,\mu^k) = x_i^k - \mu^k$ использовалось Евклидово расстояние.

Оптимальное число кластеров определяется в результате анализа зависимости целевой функции F (рис. 1). График показывает, что при $K \geq 12$ стабилизируется значение целевой функции; это гарантирует, что при таком числе кластеров выполняется свойство компактности. Экспериментально было установлено, что при $K > 12$ нарушается свойство отделимости кластеров (уже при $K = 13$ образуются кластеры, состоящие из 1 объекта). Учитывая такую проблему в использовании метода k-средних, как высокая чувствительность к выбросам, а также значительную дифференциацию регионов РФ, было задано достаточно высокое значение числа k ($K = 12$).

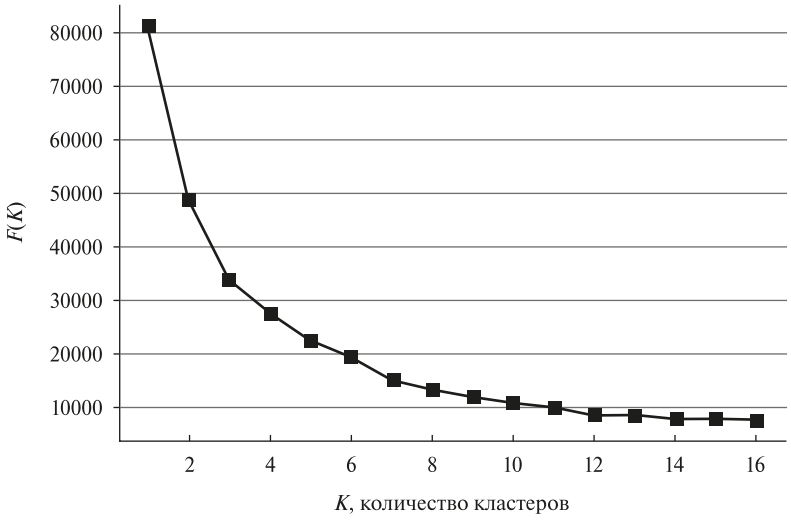


Рис. 1. Зависимость целевой функции кластеризации от числа кластеров

Алгоритм кластеризации, основанный на использовании метода k-средних и адаптированный под решаемую задачу.

1. Задается число кластеров K.

2. Инициализируются центры кластеров методом k-means++:

2.1) первый центроид инициирован случайным методом $\mu^k = x_p$, $p = \text{random}(1, N)$, $k = 1$;

2.2) расстояние каждого объекта до ближайшего центроида определяется по формуле $R_i = \min_k(\rho(x_i, \mu^k))$, $i = 1, \ldots, N$;

2.3) проводится расчет вероятности P_i каждого региона быть выбранным центром следующего кластера: $P_i = R_i^2 / \sum_j^N R_j^2$, $i = 1, \ldots, N$;

2.4) рассчитываются накопленные вероятности выбора: $S_i = \sum_{j=1}^i P_j$, $i = 1, \ldots, N$;

2.5) генерируется равномерная случайная величина $R_{nd} = \text{random}(0, 1)$;

2.6) увеличивается номер кластера ($k = k + 1$), для которого определяется центроид как регион, которому соответствует интервал накопленных частот, содержащий величину R_{nd}: $p : S_{p-1} \le R_{nd} < S_p, \mu^k = x_p$;

2.7) если $k < K$, то алгоритм повторяется (с п/п. 2.2), иначе осуществляется переход на п. 3, так как инициированы все центры кластеров.

3. На основании минимума расстояния ρ до центров кластеров каждый регион x_i закрепляется за определенным кластером $T^k = \{x_j^k\}$, $k \in \{1, 2, \ldots, K\}$:

$$x_i \to x_j^k, \quad k = \arg\min_{k=1,\ldots,K}\left(\rho\left(x_i, \mu^k\right)\right), i = 1, \ldots, N.$$

4. Пересчитываются центры кластеров: $\mu^k = \left(\mu_1^k, \ldots, \mu_L^k\right)$, $\mu_j^k = \frac{1}{n_k}\sum_{l=1}^{n_k} x_{jl}^k$, $j = 1, \ldots, L$.

5. Если произошло изменение центров кластеров или перераспределение объектов, то осуществляется переход на п. 3, если не произошло, то полученные центры кластеров $\mu^k, k = 1, \ldots, K$ и распределение объектов по кластерам $T^k = \{x_j^k\}, j = 1, \ldots, n_k$ считаются оптимальными.

Численная реализация представленного алгоритма проведена по данным табл. 1 на языке Python с использованием библиотеки машинного обучения Scikit-Learn[7].

Результаты кластерного анализа позволили классифицировать совокупность промышленных регионов за счет ее разбиения на 12 групп (кластеров) однородных по экономической специализации регионов (табл. 2).

Проверка устойчивости результата кластеризации проводилась иерархическим агломеративным методом. Схожесть результатов составила 97,5%, что подтверждает устойчивость решения, полученного на основе адаптированного алгоритма метода k-средних.

Для выявления значимых отраслей в составе каждого кластера была проведена численная оценка уровня связи между каждым кластером и критерием кластеризации. Такая оценка составлена на основании коэффициента корреляции между долями отраслей промышленности в объеме отгруженной продукции (x_{ij} из табл. 1) и фиктивной переменной, характеризующей отношение региона к определенному кластеру:

$$r_{jk} = \left(\sum_{i=1}^n \left(x_{ij} - \bar{x}_j\right)\left(C_{ik} - \bar{C}_k\right)\right)\left\{\sum_{i=1}^n \left(x_{ij} - \bar{x}_j\right)^2 \sum_{i=1}^n \left(C_{ik} - \bar{C}_k\right)^2\right\}^{-1/2}, \tag{3}$$

где C_k — фиктивная переменная принадлежности региона к определенному кластеру k:

$$C_{ik} = \begin{cases} 1, \text{если регион } i \text{ вошел в кластер } k, \\ 0 - \text{иначе.} \end{cases}$$

Результат оценки приведен на рис. 2 в форме HeatMap-отображения.

Интерпретируя согласно шкале Чеддока представленные на рис. 2 результаты, можно сделать следующие заключения: большая часть кластеров включает регионы с выраженной экономической специализацией, в основном сырьевой; только в двух кластерах — (1) и (8) — региональная экономика ориентирована на высокотехнологичные отрасли промышленности.

[7] Машинное обучение на Python (https://scikit-learn.org).

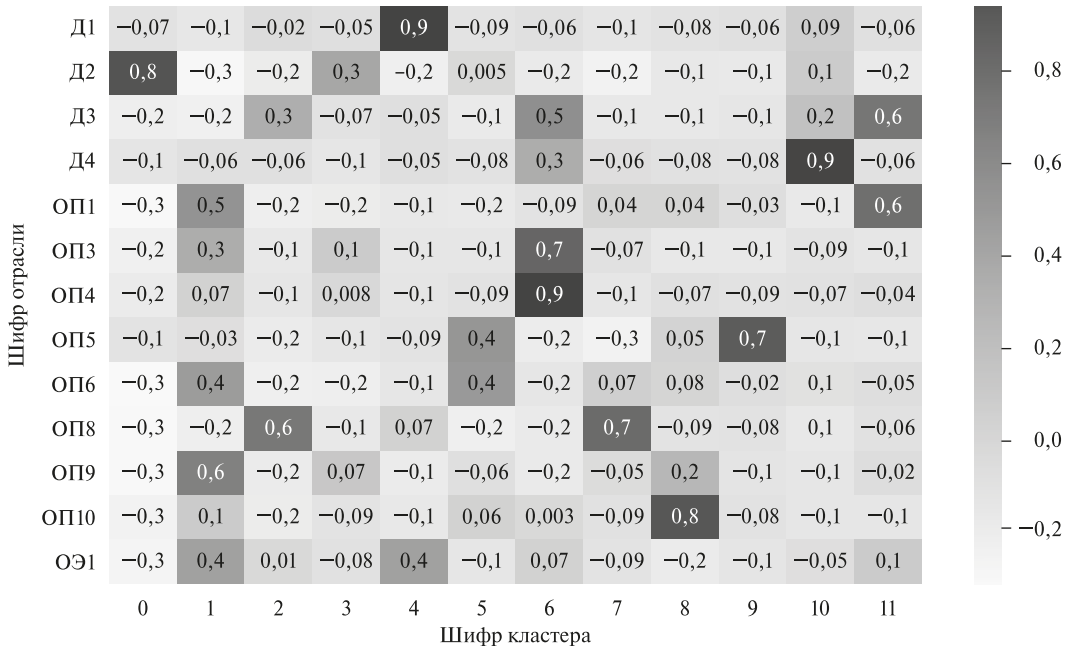


Рис. 2. Численная характеристика характера отраслевой специализации кластеров (классов) промышленно ориентированных регионов РФ

Более развернутая характеристика кластеров приведена в табл. 2. Составленная характеристика включает: а) количественные оценки уровня диверсификации экономики регионов, которые представлены средними для каждого кластера значениями коэффициента I_{HH} ($E(I_{HH})$) и значениями коэффициента вариации ($V(I_{HH})$); б) качественные (описательные) характеристики каждого кластера, в том числе идентификацию кластеров в соответствии с теоретической концепцией трехсекторной модели экономики Фишера–Кларка (Fisher, 1939) и состав отраслевых доминант; в) численные значения показателя «доля доминирующих отраслей» (d) в средней для каждого кластера оценке ($E(d)$ и $V(d)$).

Таблица 2. Характеристика кластеров промышленно ориентированных регионов РФ по экономической специализации

Кластер	Регионы РФ, сгруппированные по кластерам	Характеристика экономической специализации регионов			Доля доминирующих отраслей, d		
		Количественная оценка, I_{HH}		Описательная характеристика			
		$E(I_{HH})$	$V(I_{HH})$		Шифр	$E(d)$	$V(d)$
0	Ханты-Мансийский АО, Ямало-Ненецкий АО, Ненецкий АО; Сахалинская и Астраханская области	0,85	12	Выраженная экономическая специализация регионов; преобладает первичный сектор экономики (отрасль «Добыча НГ», «Производство кокса, нефтепродуктов»)	$Д_2$, $ОП_5$	85	10
1	Владимирская, Новгородская, Саратовская, Ленинградская, Смоленская области; Республика Марий Эл	0,13	17	Широкая отраслевая диверсификация экономики регионов; преобладает вторичный сектор экономики (обрабатывающие отрасли промышленности). Значительная роль высокотехнологичных отраслей: «Производство компьютеров, электронных и оптических изделий, электрооборудования»; «Машиностроение». Развитые отрасли: «Металлургия», «Производство пищевых продуктов». При общем свойстве — широко диверсифицированная экономика и высокая роль высокотехнологичных отраслей, отсутствуют общие доминанты в экономической специализации регионов			
2	Магаданская область; Чукотский АО	0,74	5	Выраженная экономическая специализация регионов; преобладает первичный сектор экономики — основа экономики представлена ТПК, включающим элементы «Добыча металлических руд» и «Металлургия»	$Д_3$, $ОП_8$	85	5

Окончание таблицы 2

Кластер	Регионы РФ, сгруппированные по кластерам	Характеристика экономической специализации регионов			Доля доминирующих отраслей, d		
		Количественная оценка, I_{HH}		Описательная характеристика			
		$E(I_{HH})$	$V(I_{HH})$		Шифр	$E(d)$	$V(d)$
3	Республика Карелия; Иркутская, Оренбургская и Томская области; Удмуртская Республика	0,27	30	Диверсифицированная экономика регионов; преобладает первичный сектор экономики (отрасль «Добыча НГ»). Важную роль играют также отрасли обрабатывающей промышленности, связанные с первичным сектором: «Переработка нефти» (Республика Карелия, Оренбургская и Томская области) и «Металлургия» (Удмуртская Республика, Иркутская область)	$Д_2$	46	21
4	Республика Хакасия; Кемеровская область	0,56	5	Выраженная экономическая специализация регионов; преобладает первичный сектор экономики — ТПК, включающий элементы «Добыча угля» и «Металлургия»	$Д_1$, $ОП_8$	64	13
5	Тюменская область без АО; Республики Башкортостан и Татарстан; Пермский край	0,47	20	Диверсифицированная экономика регионов; преобладает первичный сектор экономики — ТПК, включающий отрасли «Добыча НГ», «Переработка нефти». В Республиках Татарстан и Башкортостан и в Пермском крае в качестве доминант экономики выступает также отрасль «Машиностроение»	$Д_2$ $ОП_5$, $ОП_6$	22 45	23 16
6	Республика Карелия; Архангельская область без АО	0,24	10	Диверсифицированная экономика регионов; преобладает первичный сектор экономики — ТПК «Переработка древесины, производство бумаги»	$ОП_3$, $ОП_4$	40	24
7	Красноярский край; Вологодская, Свердловская, Челябинская, Липецкая и Тульская области	0,31	23	Диверсифицированная экономика регионов; преобладает первичный сектор экономики (отрасль «Металлургия»). Также развиты отрасли: «Машиностроение» (8–10%) — Свердловская, Челябинская области; «Химическое производство» (17–19%) — Вологодская, Тульская области	$ОП_8$	50	15
8	Калужская, Самарская, Нижегородская области	0,18	15	Диверсифицированная экономика регионов; преобладает вторичный сектор экономики (обрабатывающие отрасли промышленности); выраженная доминанта — «Машиностроение»	$ОП_{10}$ $ОП_8$	30 11	31 46
9	Волгоградская, Омская области	0,46	36	Диверсифицированная экономика регионов; преобладает первичный сектор экономики (доминирующая отрасль «Переработка нефти»)	$ОП_5$, $ОП_6$	64	27
10	Республика Саха (Якутия)	0,28	–	Диверсифицированная экономика регионов; представлена, в основном, первичным сектором — добывающими отраслями	$Д_1$, $Д_2$, $Д_3$, $Д_4$	88	–
11	Белгородская, Курская области	0,20	5	Диверсифицированная экономика регионов; преобладает первичный сектор — «Пищевое производство», «Добыча металлических руд»	$ОП_1$ $Д_3$	35 23	31 29

Источник: составлено авторами.

Из данных табл. 2 можно сделать два основных заключения.

1. Исследуемые кластеры неоднородны по уровню диверсификации экономики:

– кластеры 0, 2, 4 представляют регионы с выраженной экономической специализацией, причем основу их экономики составляют отрасли первичного сектора;

– регионы, входящие в кластеры 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, имеют диверсифицированную экономику, однако ее основа представлена первичным сектором;

– два кластера — 1 и 8 — характеризуются диверсифицированной экономикой регионов и преобладанием отраслей вторичного сектора.

2. Наличие выраженной общей специфики регионов внутри каждого кластера позволяет провести дифференцированную (учитывающую эту специфику) оценку социально-экономических показателей региональной экономики.

ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

Для исследования были приняты формируемые в системе государственной статистики «Основные социально-экономические показатели»[8]. Интерпретация этих показателей, проводимая в целом по совокупности промышленных регионов, затруднена из-за высокого разброса их значений, что обусловлено неоднородностью регионов. Кластеризация позволила сформировать однородные по экономической специализации группы регионов и реализовать дифференцированный подход к оценке социально-экономических показателей. Для оценки были рассчитаны средние (*E*) по каждому кластеру значения соответствующих показателей и коэффициенты вариации (*V*, %) (табл. 3).

Таблица 3. Социально-экономические показатели — характеристики кластеров экономической специализации промышленно ориентированных регионов РФ (2019 г.)

Кластер	Регионы РФ, сгруппированные по кластерам	Доля занятых в общей численности населения		Среднемесячная номинальная начисленная заработная плата, тыс. руб.		ВРП на душу населения, тыс. руб./ человек		Доля инвестиций в основной капитал в общей среднегодовой сумме основного капитала		Рентабельность отгруженной продукции	
		E	*V*	*E*	*V*	*E*	*V*	*E*	*V*	*E*	*V*
0, 10	Ненецкий АО, Астраханская, Сахалинская области, Ямало-Ненецкий АО, Ханты-Мансийский АО, Республика Саха (Якутия)	0,59	20	76,8	29	2253	113	0,07	33	0,2	66
1	Владимирская, Смоленская, Ленинградская, Саратовская области, Республика Марий Эл	0,43	5	34,3	20	378	33	0,06	33	0,08	70
2	Магаданская область, Чукотский АО	0,59	20	101	9	158	150	0,09	37	0,27	8
3	Республика Коми, Удмуртская Республика, Оренбургская, Иркутская, Томская области	0,46	4	42,5	21	551	26	0,06	39	0,17	32
4	Республика Хакасия, Кемеровская область	0,44	5	41,2	2	463	4	0,07	33	0,07	24
5	Республики Башкортостан и Татарстан, Пермский край, Тюменская область	0,45	9	40,4	14	557	31	0,06	25	0,21	89
6	Республика Карелия, Архангельская область	0,44	1	46,2	10	465	2	0,04	1	0,2	31
7	Липецкая, Тульская, Вологодская, Свердловская, Челябинская области, Красноярский край	0,48	4	40	13	543	25	0,07	19	0,22	63
8	Калужская, Нижегородская, Самарская области	0,51	1	37,7	9	453	6	0,05	5	0,08	15
9	Волгоградская, Омская области	0,45	2	34,4	4	347	2	0,08	11	0,06	56
11	Белгородская, Курская области	0,47	4	33,7	4	488	25	0,07	33	0,22	1
В целом, по совокупности промышленно ориентированных регионов		0,47	18	48	44	622	219	0,06	33	0,17	67
В целом по РФ		0,48	16	47,9	38	579	169	0,06	49	0,23	85

Источник: расчеты авторов.

[8] Регионы России. Социально-экономические показатели 2020, раздел 1.1 (https://gks.ru/bgd/regl/b20_14p/Main.htm).

По данным табл. 3 могут быть сделаны следующие выводы:

– коэффициенты вариации по большей части показателей имеют допустимые значения, что подтверждает однородность регионов в составе каждого кластера и возможность необходимых обобщений при анализе социально-экономических показателей; при этом из анализа были исключены несколько показателей, по которым отмечается высокий уровень V (эти показатели выделены в табл. 3 серым цветом);

– уровень средней заработной платы выше среднероссийского уровня только для кластеров 0 и 2; кластеры 1, 8, 9, 11 характеризуются низким уровнем этого показателя, что определяет угрозы отрицательной миграции кадров из тех регионов, которые обеспечивают технологичный потенциал промышленности страны;

– характеристика инвестиционной активности (в основной капитал) имеет очевидно недостаточный уровень, принимая во внимание важную роль основного капитала и значительный уровень износа основных фондов в промышленности;

– показатель рентабельности в промышленном секторе существенно ниже среднего по РФ уровня, особенно по кластерам 1, 4, 8, 9; это может свидетельствовать о недостаточных инвестиционных возможностях предприятий обрабатывающей промышленности в обеспечение их технологического роста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном нами исследовании составлена классификация промышленно ориентированных регионов РФ с учетом их экономической специализации. Для этого был разработан адаптированный алгоритм кластеризации и выполнена его численная реализация.

Кластеризация промышленных регионов РФ позволила выявить некоторые существенные закономерности:

а) при высокой неоднородности промышленных регионов по уровню диверсификации экономики большая часть кластеров представлена регионами с выраженной специализацией, ориентированной на сырьевые товары, и преобладанием отраслей первичного сектора;

б) диверсифицированная экономика и ведущее значение отраслей обрабатывающей промышленности характерны только для двух кластеров — 1, 8;

в) для регионов, входящих в кластеры 1 и 8, характерно невысокое значение основных экономических показателей.

Содержание кластеров промышленных регионов наглядно иллюстрирует негативные проявления структурных сдвигов в национальной экономике и диспропорции ее пространственного развития, отмечаемые многими российскими учеными (Вызовы и политика..., 2020; Лившиц, 2013; и др.). В частности, из результатов проведенного нами кластерного анализа явно прослеживается, что ряд регионов, относимых ранее к числу наиболее промышленно развитых и включающих в свою отраслевую специализацию (в качестве выраженных доминант) высокотехнологичные производства, в настоящее время относятся к кластерам с преобладающим первичным сектором экономики. В числе таких регионов следует отметить Удмуртскую Республику, Томскую, Оренбургскую, Свердловскую области. Одним из результатов структурных сдвигов явилось преобладание в экономическом пространстве РФ первичного сектора, включающего добывающие отрасли и низкотехнологичные отрасли обрабатывающей промышленности.

Специализация на отраслях первичного сектора экономики, как правило, редко создает предпосылки к устойчивому экономическому росту. Диверсификация экономики — расширение ее структуры — становится необходимой стадией развития промышленного сектора национальной экономики. Важную роль в диверсификации экономики играет государственная стратегия пространственного поляризованного развития (Швецов, 2018). В реализации этого приоритета необходим взвешенный подход. Чтобы сформировать полюса роста национального масштаба, необходимо учитывать сложившиеся центры концентрации производительных сил и перспективы их развития в условиях неоиндустриальной экономики (Минакир, 2018; Швецов, 2018 и др.). Разработанный алгоритм кластеризации позволяет систематизировать исследования по данному вопросу, увидеть состав промышленных регионов с позиции перспектив их развития и актуальности государственных регулирующих воздействий.

Таким образом, представленный в статье адаптированный алгоритм кластеризации позволил классифицировать промышленные регионы РФ по характеру их специализации и обозначить ряд важных закономерностей. Целесообразность продолжения данного исследования видится, в частности, в необходимости расширить пространство критериев кластеризации, а также использовать подход кластерной динамики для уточнения причин перехода регионов из одних кластеров в другие, что позволит повысить эффективность государственной политики индустриального развития РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Айвазян С.А., Афанасьев М.Ю., Кудров А.В. (2016). Метод кластеризации регионов РФ с учетом отраслевой структуры ВРП // *Прикладная эконометрика*. № 1 (41). С. 24–46. [**Aivazian S., Afanasiev M., Kudrov A.** (2016). Clustering methodology of the Russian Federation regions with account of sectoral structure of GRP. *Applied Econometrics*, 1, 41, 24–46 (in Russian).]

Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. (1989). Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с. [**Ayvazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enjukov I.S., Meshalkin L.D.** (1989). *Applied statistics. Classification and dimension reduction*. Moscow: Finansy i statistika (in Russian).]

Вызовы и политика пространственного развития России в XXI веке (2020). В.М. Котляков, А.Н. Швецов, О.Б. Глезер (ред.). М.: Товарищество научных изданий КМК. 365 с. [*Challenges and policy of Russia's spatial development in the 21st century* (2020). V.M. Kotlyakov, A.N. Shvetsov, O.B. Glezer (Eds). Moscow: KMK Scientific Press Ltd. 365 p. (in Russian)]

Голова И.М., Суховей А.Ф. (2019). Дифференциация стратегий инновационного развития с учетом специфики российских регионов // *Экономика региона*. Т. 15. № 4. С. 1294–1308. DOI: 10.17059/2019-4-25. [**Golova I.M., Sukhovey A.F.** (2019). Differentiation of innovative development strategies cconsidering specific characteristics of the Russian regions. *Economy of Region*, 15, 4, 1294–1308 (in Russian). DOI: 10.17059/2019-4-25 (in Russian).]

Лившиц В.Н. (2013). Системный анализ рыночного реформирования нестационарной экономики России: 1992–2013. М.: ЛЕНАНД. 640 с. [**Livshits V.N.** (2013). *System analysis of the market reform of Russia's non-stationary economy*: 1992–2013. Moscow: LENAND. 640 p. (in Russian).]

Локосов В.В., Рюмина Е.В., Ульянов В.В. (2015). Региональная дифференциация показателей человеческого потенциала // *Экономика региона*. № 4. С. 185–196. DOI: 10.17059/2015-4-15 [**Lokosov V.V., Ryumina Ye.V., Ulyanov V.V.** (2015) Regional differentiation of human potential indicators. *Economy of Region*, 4, 185–196. DOI: 10.17059/2015-4-15 (in Russian).]

Локосов В.В., Рюмина Е.В., Ульянов В.В. (2019). Кластеризация регионов России по показателям качества жизни и качества населения // *Народонаселение*. Т. 22. № 4. С. 4–17. DOI: 10.24411/1561-7785-2019-00035. [**Lokosov V.V., Ryumina E.V., Ulyanov V.V.** (2019). Clustering of regions by indicators of quality of life and quality of population. *Population,* 22, 4, 4–17. DOI: 10.24411/1561-7785-2019-00035 (in Russian).]

Минакир П.А. (2018). «Стратегия пространственного развития» в интерьере концепций пространственной организации экономики // *Пространственная экономика*. № 4. С. 8–20. DOI: 10.14530/se.2018.4.008-020. [**Minakir P.A.** (2018). "The strategy of spatial development" in the interior of the concepts of the spatial organization of the Economy. *Spatial Economics*, 4, 8–20. DOI: 10.14530/se.2018.4.008-020 (in Russian).]

Михеева Н.Н. (2013). Структурные факторы региональной динамики: измерение и оценка // *Пространственная экономика*. № 1. С. 11–32. [**Mikheeva N.N.** (2013). Structural factors of regional dynamics: Measurement and assessment. *Spatial Economics*, 1, 11–32 (in Russian).]

Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. (1989). Кластерный анализ. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика. 215 с. [**Oldenderfer M.S., Blashfield R.K.** (1989). *Cluster analysis. Factorial, discriminant and cluster analysis*. Moscow: Finansy i statistika (in Russian).]

Охапкина Е.П., Охапкин В.П. (2015). Подходы к кластеризации групп социальной сети // *Компьютерные исследования и моделирование*. Т. 7. № 5. С. 1127–1139. [**Okhapkina E.P., Okhapkin V.P.** (2015). Approaches to a social network groups clustering. *Computer Research and Modeling*, 7, 5, 1127–1139 (in Russian).]

Петрыкина И.Н. (2013). Кластерный анализ регионов Центрального федерального округа по уровню развития человеческого капитала // *Вестник ВГУ. Серия: экономика и управление*. № 1. С. 72–80. [**Petrykina I.N.** (2013). Cluster analysis of regions of the Central Federal District in terms of human capital development. *Proceedings of VSU. Series: Economics and Management*, 1, 72–80 (in Russian).]

Тимошенко А.И. (2012). Сибирские территориально-производственные комплексы: исторический опыт и новые проекты // *Историко-экономические исследования*. Т. 13. № 1. С. 71–93. [**Timoshenko A.I.** (2012). Siberian territorial-production complexes: Historical experience and new projects. *Historical and Economic Research,* 13, 1, 71–93 (in Russian).]

Швецов А.Н. (2018). Инструменты политики поляризованного пространственного развития // *Федерализм*. № 1 (89). С. 82–103. [**Shvetsov A.N.** (2018). Policy instruments of polarized spatial development. *Federalism*, 1 (89), 82–103 (in Russian).]

Arthur D., Vassilvitskii S. (2007). K-means++: The advantages of careful seeding. *Conference: Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on discrete algorithms, SODA 2007.* New Orleans, Louisiana, USA. DOI: 10.1145/1283383.1283494

Fisher A.G.B. (1939). Production, primary, secondary and tertiary. *Economic Record,* 15, 1, 24–38. Available at: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1475-4932.1939.tb01015.x

Cluster analysis and classification of Russia's industrial oriented regions by economic specialization

© 2022 O.M. Shatalova, E.V. Kasatkina, V.N. Livchits

O.M. Shatalova,
Udmurt Branch of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Izhevsk, Russia; e-mail: oshatalova@mail.ru

E.V. Kasatkina,
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia; e-mail: e.v.trushkova@gmail.com

V.N. Livchits
Federal State Institution "Federal Research Center 'Informatics and Management'" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: livchits@isa.ru.

Received 14.09.2021

The article was prepared according to the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences and the research plan of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for 2021–2023 (theme "Methodology of innovative development of region-oriented systems in an unstable economic environment").

Abstract. In the context of high socio-economic differentiation of the constituent entities of the Russian Federation (RF), the research tasks of their classification are highly relevant, since such classification contributes to the identification of homogeneous groups of regions; each group has its own particularity. The purpose of the research was to classify the industrially oriented regions of the RF by the nature of their economic specialization and to develop the necessary economic and mathematical methods. The classification of regions according to the criterion of their economic specialization was carried out using intelligent mathematical methods of cluster analysis. To solve the research problem, an adapted k-means algorithm was developed. The result of clustering was the division of industrial regions' aggregate into twelve classes. Also, the result of the research was a meaningful interpretation of the identified clusters. In particular, a differentiated assessment of the economic indicators of the regions was compiled, taking into account the specifics of each cluster. The clustering also made it possible to compile descriptive characteristics of clusters which correspond to the concept of a three-sector model of the economy (Fisher–Clark) and was based on a quantitative assessment of the of diversification of the regions. The results of our research made it possible to clarify some regularities that are essential for the spatial development of the country's economy, which may be important for increasing the effectiveness of industrial, innovation, and fiscal policy of state administration.

Keywords: regional economy, sustainable development, spatial development, industrially oriented regions, economic specialization, diversification of the region's economy, cluster analysis, machine learning.

JEL Classification: C38, O14, R11.

Quoting: **Shatalova O.M., Kasatkina E.V., Livchits V.N.** (2022). Cluster analysis and classification of Russia's industrial oriented regions by economic specialization. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 80–91. DOI: 10.31857/S042473880018971-7

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 92–103

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Элементы корреляционного анализа в оценке цифрового неравенства отдельных регионов России

© 2022 г. М.Н. Дудин, С.В. Шкодинский, Д.И. Усманов

М.Н. Дудин,
Институт проблем рынка РАН, Москва, e-mail: dudinmn@mail.ru

С.В. Шкодинский,
Институт проблем рынка РАН; Научно-исследовательский финансовый институт Минфина России, Москва, e-mail: sh-serg@bk.ru

Д.И. Усманов,
Институт проблем рынка РАН, Москва, e-mail: us.dali@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2021

Статья подготовлена в рамках государственного задания ИПР РАН, тема НИР «Институциональная трансформация экономической безопасности при решении социально-экономических проблем устойчивого развития национального хозяйства России».

Аннотация. Предмет исследования — специфические социально-экономические отношения, опосредующие процессы цифрового неравенства регионов Сибирского федерального округа в контексте корреляционного анализа. Цель исследования — проведение комплексной оценки и выявление корреляции между рейтингами цифровизации и показателями социально-экономического развития российских регионов (по данным Сибирского федерального округа, СФО) в интересах обоснования эффективного механизма сглаживания регионального неравенства в цифровой сфере. Методология исследования основана на принципах, методах и подходах корреляционного анализа, статистических методах обработки информации, а также на анализе вторичных источников информации о социально-экономическом положении региона и уровне развития информационно-коммуникационных технологий в нем. Результаты — актуализированы данные о наличии цифрового неравенства в регионах СФО. Выявлена взаимосвязь между уровнем развития информационно-коммуникационных технологий и социально-экономическим положением территорий, что обуславливает важную роль устранения цифрового неравенства в деле повышения экономической безопасности регионов. Обоснована важность увеличения ИКТ-бюджетов регионов СФО. Исследование показало, что успешный опыт преодоления цифрового неравенства включает мероприятия, направленные на повышение доступности ИКТ, уровня проникновения цифровых услуг и удельного веса грамотных специалистов в области ИКТ. Использование элементов корреляционного анализа позволяет выявить причинно-следственные связи регионального цифрового неравенства в условиях существенной территориальной раздробленности и дифференциации социально-экономического положения субъектов Федерации России. Программы преодоления цифрового неравенства должны опираться на соответствующий механизм, обеспечивающий построение сетевой инфраструктуры и проникновение цифрового пространства в удаленные районы и сельскую местность параллельно с повышением общей цифровой грамотности населения. Как показывает практика, механизм выравнивания, сглаживания уровня цифрового неравенства неизбежно влечет за собой рост экономической активности, повышение экономической безопасности регионов, роста их конкурентоспособности на локальном, общероссийском и мировом рынках.

Ключевые слова: цифровизация, социально-экономическое развитие, ИКТ, широкополосный доступ, цифровое неравенство.

Классификация JEL: C40, R15.

Цитирование: **Дудин М.Н., Шкодинский С.В., Усманов Д.И.** (2022). Элементы корреляционного анализа в оценке цифрового неравенства отдельных регионов России // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 92–103. DOI: 10.31857/S042473880014670-6

ВВЕДЕНИЕ

Неоднородность цифрового пространства может иметь разные характеристики и выражения. С одной стороны, она проявляется в неравенстве возможностей получения доступа к современным информационно-коммуникационным технологиям (ИКТ), из-за чего возникают так называемые «цифровые разрывы» и «цифровое неравенство», применимые не только к гражданам, организациям, но и к отдельным территориям или странам. С другой стороны, цифровые технологии распространяются на разных уровнях и с разной скоростью вследствие дифференциации социально-экономического развития как в страновом, так и региональном разрезе. В современном мире информационно-коммуникационные технологии рассматриваются не просто как инструмент общения и передачи данных, но и как важнейший фактор развития социальной инфраструктуры и жизнеобеспечения (Гайнанов, Шарифьянов, 2014).

В этой связи актуализируется проблематика цифрового неравенства регионов, обусловленная необходимостью поиска и обоснования научных и ориентированных на практику подходов, способных обеспечить на приемлемом уровне развития доступность сетей передачи данных, а также достаточную для обеспечения бесперебойного широкополосного доступа (ШПД) в Интернет пропускную способность всем группам населения, независимо от их территориального размещения. Особенно это актуально для Российской Федерации, имеющей обширную территорию, а специфика получения ШПД в удаленных, отдаленных регионах и сельской местности такова, что, имея, к примеру, уровень проникновения, близкий к 100% (например, в Новосибирской области), по факту десятки, если не сотни, малых населенных пунктов в российской глубинке вообще не имеют доступа к Интернету.

Подчеркнем сложности построения развитой транспортной и телекоммуникационной инфраструктуры на территории Сибирского федерального округа (СФО), который является примером глубокой дифференциации региона по уровню доступности элементов цифровой инфраструктуры. Таким образом, объективная необходимость устранения цифрового неравенства как между регионами, так и внутри субъектов Федерации обуславливает актуальность темы настоящего исследования.

Подчеркнем, что исследовательский интерес к проблематике цифрового неравенства наблюдается уже достаточно давно, с начала 2000-х годов. Причем большое число работ опубликовано и экономистами, и социологами, и политологами, и даже философами. Неудивительно, проблема — междисциплинарная.

В частности, ряд исследователей отмечают, что в современном мире цифровизация является необходимым атрибутом обеспечения общей безопасности региона (Баженов, 2021, с. 65). Как следствие — к одной из основных проблем экономической безопасности регионов отнесена проблема «цифрового неравенства» (Попов, Семячков, 2018, с. 1088–1101). В этой связи, как считают Е.В. Попов и К.А. Семячков, прогнозирование вызовов и угроз цифровизации и цифровой безопасности является «приоритетной задачей обеспечения экономической безопасности» (Попов, Семячков, 2018, с. 1099). Однако проблема соотношения экономической безопасности региона с уровнем цифрового неравенства практически не исследована.

На это указывает в своей работе М.В. Власов (Власов, 2020). Автор расчетным путем доказал зависимость между уровнями цифровизации и экономической безопасности регионов: между ними «установлено наличие высокой корреляционной взаимосвязи» (Власов, 2020, с. 271–287). В работе (Сошина, 2020, с. 31–39) делается заключение, что приоритетной задачей «в обеспечении... экономической безопасности регионов... является обеспечение всей системы цифровизации экономики региона».

Изучению особенностей развития ИКТ, цифрового неравенства и цифровой экономики в региональном разрезе посвятили свои исследования авторы (Бублик и др., 2018; Батракова, 2019; Минаков, Евраев, 2020, с. 63; Квасникова, 2020). В работе (Шамсутдинова, 2019, с. 330–353) подчеркивается: «Проблема преодоления цифрового неравенства... может быть решена... с привлечением ресурсов федерального управления».

Особенно существенное проявление тенденции цифрового неравенства в рамках отдельных регионов России обострилось в условиях пандемии, на что указано в (Печаткин, 2020). В частности, там же отмечается, что «для устранения цифрового неравенства... необходимы дополнительные мероприятия... по сглаживанию цифрового неравенства между регионами».

Наконец, особенно интересно выглядит работа (Дедюлина, 2017, с. 23), посвященная философскому осмыслению цифрового неравенства, в которой автор утверждает, что цифровое

неравенство — это не техническая и не экономическая проблема, а проблема, требующая философского осмысления (Дедюлина, 2017, с. 23). Безусловно, мы разделяем точку зрения автора в том, что в цифровом пространстве проявляются новые социальные диспропорции, требующие внимательного изучения и осмысления.

В то же время считаем необходимым заострить внимание на проблематике цифрового неравенства с точки зрения оценки и выявления корреляции между рейтингами цифровизации и показателями социально-экономического развития российских регионов. Считаем, что это позволит обосновать эффективный механизм сглаживания уровня цифрового неравенства на основе реализации мероприятия по качественному улучшению кадрового и научно-технического потенциала региона. Именно это авторы и заявляют в качестве основной цели настоящего исследования. Наш анализ мы проведем на примере регионов СФО.

Основные задачи исследования: выявление узких мест и слабых сторон в развитии цифровизации территорий региона; сбор, систематизация информации и анализ опыта решения проблемы цифрового неравенства в других регионах России; выделение на основе данной информации ключевых мероприятий, направленных на сглаживание цифрового неравенства в СФО.

МЕТОДОЛОГИЯ

Методология исследования основана на принципах, методах и подходах корреляционного анализа, статистических методах обработки информации, а также на анализе вторичных источников информации о социально-экономическом положении региона и уровне развития информационно-коммуникационных технологий в нем. На первоначальном этапе исследования обобщались и сопоставлялись показатели цифровизации регионов СФО: уровень проникновения ШПД в Интернет; ИКТ-бюджеты (в том числе на душу населения); рейтинговые баллы по индексу «Цифровая Россия». Далее по вышеуказанным показателям выявлялись корреляционные связи с итоговыми показателями социально-экономического развития регионов СФО (табл. 1).

По результатам корреляционного анализа выявлялись недостатки и слабые стороны региональной цифровизации, намечались пути их устранения, определялись яркие представители цифрового разрыва среди регионов СФО. Завершающим этапом исследования стало обобщение опыта других регионов и составление программы действий, направленных на создание механизма сглаживания цифрового неравенства в СФО.

Таблица 1. Источники исходной информации для проведения исследования

Показатели развития ИКТ в регионах и социально-экономическое развитие региона	Цель наблюдений	Показатели социально-экономического развития регионов и результаты перекрестных наблюдений		
		ВРП на душу населения СФО (2018–2019)	Рейтинг социально-экономического положения регионов (СЭПР)	Выводы и результаты
Индекс «Цифровая Россия»-2018	Первоначальное ранжирование регионов по уровню развития ИКТ	Взаимосвязь между уровнем цифрового и социально-экономического развития	Взаимосвязь рейтингов цифрового и социально-экономического развития	Определение лидеров и аутсайдеров цифровизации
Уровень проникновения ШПД в Интернет по регионам (2017–2019)	Выявление цифрового неравенства регионов на основании показателей	Взаимосвязь между уровнем проникновения ШПД и экономическими результатами	Взаимосвязь между уровнем проникновения ШПД и положением в рейтинге социально-экономического развития	Выявление необходимости дальнейшего развития ШПД в Интернет
Рейтинг ИКТ-расходов регионов на душу населения (2018–2020)	Выявление наиболее затратных регионов на цифровизацию	Выявление эффективности удельных затрат на цифровизацию	Выявление зависимости влияния затрат на цифровизацию и уровнем социально-экономического развития	Выявление наиболее финансовоемких регионов с точки зрения цифровизации и необходимости развития отсталых регионов

Источник: разработано авторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опираясь на экономико-математический инструментарий, определим уровень цифровизации регионов СФО и наличие цифрового разрыва (неравенства) на основе изучения и поиска корреляции индекса «Цифровая Россия», составленного Московской школой управления Сколково, рейтинга ИКТ-бюджетов регионов за 2018–2020 гг., уровня проникновения ШПД в Интернет за 2017–2019 гг. по данным официальной статистики (табл. 2).

Обращают на себя внимание несколько обстоятельств.

1. Индекс «Цифровая Россия» по СФО (56,00) ниже среднего значения по федеральным округам (58,14), поэтому макрорегион уже подпадает под понятие «отстающий в цифровом развитии» (пятое место в рейтинге из восьми субъектов Федерации).

2. Ни в одном регионе округа в 2018 г. расходы на ИКТ на душу населения не достигли среднего значения по стране (812,3 руб. на 1 человека). Разрыв достигает 10 и более раз. Наиболее яркими представителями наличия цифрового разрыва являются: Республика Тыва (самый низкий индекс цифровизации из всех 85 регионов России (39,74) и уровень проникновения ШПД (54,6) (за исключением Крыма и Ненецкого АО), несмотря на довольно значительные ИКТ-расходы на душу населения), а также Алтайский край (индекс ниже среднего по округу и стране (54,71), а ИКТ-расходы на душу населения (50,3 руб.) ниже среднего по округу более чем в пять раз, ниже среднего значения по стране в 18 раз). Уровень проникновения ШПД в Интернет в Республике Алтай также существенно не дотягивает до среднего значения по округу.

3. Безусловными лидерами цифровизации среди регионов СФО являются Новосибирская, Иркутская, Томская области. Новосибирская область занимает первое место по всем параметрам цифрового развития в округе, Иркутская область, наряду с Томской, занимает второе–третье места в рейтинге «Цифровая Россия» и по уровню проникновения ШПД в Интернет среди регионов СФО (несмотря на последнее место по уровню ИКТ-расходов на душу населения).

4. По уровню проникновения ШПД в Интернет СФО находится также на пятом месте, как и в рейтинге «Цифровая Россия». Лидеры (Новосибирская, Иркутская, Томская области) и аутсайдеры (Республика Тыва) обоих рейтингов совпадают, что дает основания считать рейтинг цифровизации довольно объективным. Согласно рейтингу цифрового развития регионов «Цифровая Россия-2018», который, впрочем, за два года существенно устарел, как минимум, четыре региона СФО отстают в цифровом развитии (все три республики и Алтайский край). Это уже на первоначальном этапе позволяет считать данные территории основными представителями цифрового разрыва в СФО.

Таблица 2. Сопоставление рейтингов цифрового развития регионов СФО за 2018 г.

Регион	Индекс «Цифровая Россия», 2018		ИКТ-расходы на душу населения, 2018		Уровень проникновения ШПД в Интернет (стационарного и мобильного) на конец 2018 г., на 100 человек населения	
	Балл	Место	Руб.	Место	%	Место
Новосибирская область	73,10	1	754,3	1	124,2	1
Иркутская область	67,07	2	45,6	10	113,6	2
Томская область	64,24	3	176,2	6	102,6	3
Красноярский край	63,94	4	457,0	4	97,2	7
Кемеровская область	62,09	5	83,3	8	96,0	8
Омская область	60,30	6	93,2	7	97,8	5
Алтайский край	54,71	7	50,3	9	97,4	6
Республика Алтай	51,76	8	737,2	2	87,5	9
Республика Хакасия	46,60	9	254,1	5	99,0	4
Республика Тыва	39,74	10	506,8	3	54,6	10
Сибирский федеральный округ	56,00	5	273,0	н.д.	103,2	5
Российская Федерация	58,14	–	812,3	–	107,9	–

Источники: составлено авторами на основе данных (Сколково: Индекс «Цифровая Россия», 2019; Агентство CNEWS Analytics, 2020; Росстат: Регионы России[1], 2020).

[1] https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204

Таблица 3. Сопоставление рейтингов цифровизации и социально-экономического положения регионов СФО за 2018 г.

Субъект РФ	Индекс «Цифровая Россия»	Рейтинг СЭПР-2018	Место в индексе «Цифровая Россия»	Место в рейтинге СЭПР-2018
Новосибирская область	73,10	49,59	1	4
Иркутская область	67,07	49,69	2	3
Томская область	64,24	38,83	3	6
Красноярский край	63,94	57,03	4	1
Кемеровская область	62,09	54,06	5	2
Омская область	60,30	45,16	6	5
Алтайский край	54,71	38,47	7	7
Республика Алтай	51,76	13,81	8	9
Республика Хакасия	46,60	27,79	9	8
Республика Тыва	39,74	10,21	10	10
Сибирский ФО	56,00	38,50	5	6
Российская Федерация	58,14	41,60	–	–

Источник: составлено авторами на основе данных «Сколково: Индекс “Цифровая Россия”»[2]; РИА РЕЙТИНГ[3].

О взаимосвязи экономического и цифрового развития данных регионов свидетельствует следующий факт. Точно такой же результат по регионам СФО зафиксирован и в рейтинге СЭПР-2018 — все те же четыре аутсайдера, причем практически в том же порядке (Алтайский край, Республика Алтай, Республика Хакасия, Республика Тыва) (табл. 3).

Взаимосвязь между рейтингами цифровизации и социально-экономическим положением регионов сильная, что демонстрирует статистическое моделирование связи между явлениями, где за факторный признак взят рейтинг «Цифровая Россия» (ЦР), за результативный — рейтинг СЭПР. Коэффициент детерминации — 0,711, что означает сильную связь между явлениями (см. рисунок).

Наше наблюдение подтвердило ранее высказанные мнения о том, что цифровое неравенство федеральных округов (ФО) обусловлено неравномерностью социально-экономического развития регионов в их составе, причем для отсталых регионов, судя по всему, признаки меняются местами — факторным становится СЭПР, а результативным — уровень развития ИКТ, и именно слабые экономические показатели выступают негативным фактором для благоприятного развития цифровой среды. Доказательством этого может служить сопоставление рейтинга «Цифровая Россия»

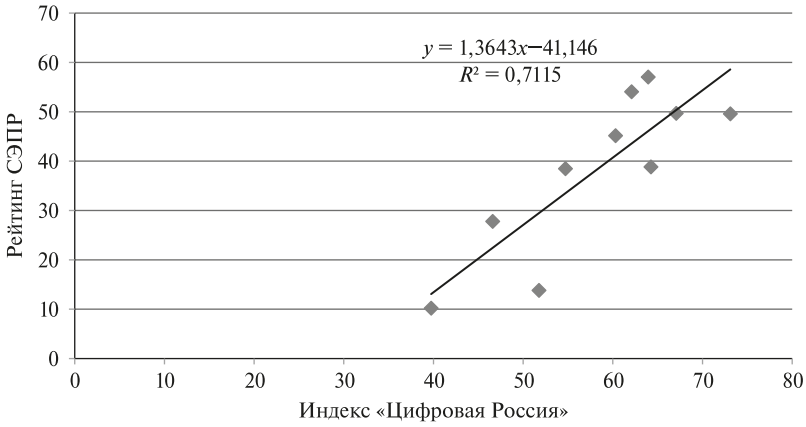


Рисунок. Уравнение линейной регрессии между рейтингами цифровизации и социально-экономического положения регионов СФО в 2018 г.

Источник: рассчитано авторами.

[2] https://finance.skolkovo.ru/ru/sfice/research-reports/1779-2019-04-22/

[3] https://riarating.ru/infografika/20200602/630170513.html

Таблица 4. Сопоставление рейтингов цифровизации и ВРП на душу населения в регионах СФО за 2018 г.

Субъекты РФ	Индекс «Цифровая Россия»	ВРП на душу населения, 2018, руб.	Место в индексе «Цифровая Россия»	Место по ВРП на душу населения
Новосибирская область	73,10	448 658,8	1	5
Иркутская область	67,07	580 152,8	2	2
Томская область	64,24	537 512,2	3	3
Красноярский край	63,94	792 980,5	4	1
Кемеровская область	62,09	462 495,1	5	4
Омская область	60,30	349 165,7	6	7
Алтайский край	54,71	234 885,9	7	8
Республика Алтай	51,76	231 464,2	8	9
Республика Хакасия	46,60	438 326,0	9	6
Республика Тыва	39,74	212 874,5	10	10
Сибирский федеральный округ	56,00	484 394,2	5	5
Российская Федерация	58,14	578 740,0	–	–

Источники: составлено авторами на основе данных («Сколково: Индекс “Цифровая Россия”», Агентство CNEWS Analytics[4], Росстат: Регионы России).

и ВРП на душу населения: пятерки лидеров и замыкающих полностью совпадают, а безусловным аутсайдером остается Республика Тыва (табл. 4).

Правда, как показало статистическое моделирование связи, корреляция между данными явлениями более слабая ($R^2 = 0{,}377$; связь умеренная). При этом в самом рейтинге составители прямо указывают, что с каждым годом уровень проникновения цифровых технологий возрастает, а степень цифрового неравенства сокращается, поэтому основываться на данных 2018 г. в настоящем исследовании было бы в корне неверным.

Рассмотрим более актуальные данные об ИКТ-бюджетах регионов за 2018–2020 гг. Анализируя динамику ИКТ-бюджетов, отмечаем, что в целом по СФО за последние два года наблюдается рост ИКТ-расходов на душу населения выше среднего по стране (146 против 78,2%), что расценивается положительно.

При этом практически все регионы, кроме одного (Красноярский край, который, как выяснится ниже, является лидером социально-экономического развития), демонстрируют повышение данного показателя (табл. 5).

Тем не менее ни в начале периода, ни в конце показатель ИКТ-расходов на душу населения не сравнялся с общероссийским, разрыв сократился, но до сих пор составляет более двух раз

Таблица 5. Динамика изменения ИКТ-расходов на душу населения в СФО

Регион	2018 г.	2019 г.	2020 г.	Изменение за два года, руб.	Изменение за два года, %
Республика Тыва	506,8	788,3	1909,3	1402,5	276,7
Республика Алтай	737,2	834,0	1878,0	1140,8	154,8
Новосибирская область	754,3	978,7	1240,7	486,4	64,5
Кемеровская область	83,3	162,2	667,2	583,8	700,6
Республика Хакасия	254,1	322,2	657,2	403,1	158,6
Алтайский край	50,3	116,2	566,3	516,0	1025,0
Омская область	93,2	82,5	515,6	422,4	453,4
Красноярский край	457,0	483,9	422,7	−34,3	−7,5
Томская область	176,2	181,1	411,9	235,7	133,8
Иркутская область	45,6	151,0	365,3	319,7	700,5
Сибирский федеральный округ	273,0	358,2	671,7	398,7	146,0
Российская Федерация	812,3	1099,5	1447,3	635,0	78,2

Источник: рассчитано авторами.

[4] https://www.cnews.ru/articles/2020-05-22_regiony_planirovali_uvelichit_itrashody

Таблица 6. Доля ИКТ-расходов на душу населения в ВРП на душу населения, %

Регион	2018 г.	2019 г.	Абсолютное отклонение
Республика Тыва	0,24	0,36	0,12
Республика Алтай	0,32	0,34	0,02
Новосибирская область	0,17	0,21	0,04
Республика Хакасия	0,06	0,07	0,01
Красноярский край	0,06	0,06	0,00
Алтайский край	0,02	0,05	0,03
Иркутская область	0,01	0,03	0,02
Томская область	0,03	0,03	0,00
Кемеровская область	0,02	0,03	0,01
Омская область	0,03	0,02	−0,01
Сибирский ФО	0,06	0,07	0,02
Российская Федерация	0,14	0,19	0,05

Источник: рассчитано авторами.

(671,7 руб. по СФО против 1447,3 руб. по РФ в 2020 г.). Выше среднего значения по стране из числа регионов СФО имеют показатель расходов на ИКТ на душу населения в 2020 г. только явные аутсайдеры цифрового развития — Республики Тыва и Алтай (1909,3 и 1878 руб. соответственно), а Красноярский край вообще демонстрирует снижение в абсолютных и относительных показателях в 2020 г. (–7,5% по сравнению с 2018 г.). В тройку лидеров входит также Новосибирская область (1240,7 руб.), а всем остальным регионам стоит задуматься об увеличении ИКТ-бюджетов.

Далее проанализируем динамику соотношения ИКТ-расходов на душу населения и ВРП на душу населения в 2018–2019 гг. (табл. 6).

Как и следовало ожидать, тройка лидеров (Республики Тыва и Алтай, Новосибирская область) демонстрирует значения данного соотношения выше среднероссийских (0,17–0,36 против 0,14–0,19%), а остальные регионы (как и в целом СФО) значительно уступают по данному показателю и в 2018, и в 2019 г. Мало того что сам по себе удельный вес ИКТ-расходов на душу населения в ВРП на душу населения ничтожен (измеряется сотыми долями процентов), так при этом повышения его доли практически не наблюдается (прирост по СФО всего 0,02 п.п.). Так как корреляции между наблюдаемыми явлениями нет ($R^2 = 0{,}053$; связь практически отсутствует), очевидно, что высокая доля, если не большая часть, всех бюджетов на ИКТ уходит на социальные программы, не связанные с общественным воспроизводством. В частности, на государственную программу цифровизации здравоохранения, т.е. на финансирование создания цифрового контура здравоохранения на базе Единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения (ЕГИСЗ). В 2020 г. основные расходы бюджета приходятся на данные мероприятия. Поэтому не стоит ожидать от прироста данного показателя существенного прибавления ВРП. Кроме того, это вызывает опасения относительно сохранения положительной динамики финансирования сферы ИКТ в регионах в будущем.

В табл. 7 представлено сопоставление рейтингов цифровизации и социально-экономического развития регионов СФО за 2019–2020 гг.

Как видим, безоговорочные лидеры социально-экономического развития регионов — Красноярский край, Кемеровская область, Иркутская область — имеют весьма посредственные показатели ИКТ-расходов на душу населения. А Республики Алтай и Тыва, лидируя по данному показателю не только в СФО, но и находясь в ТОП-20 среди всех российских регионов, практически замыкают рейтинг СЭПР. Поэтому прямой корреляции между уровнем финансирования ИКТ и экономическими показателями нет и не может быть в силу объективных пространственно-климатических и физико-географических характеристик различных территорий страны, ярким примером чего является СФО.

Главным выводом из корреляционного анализа уровней цифрового и социально-экономического развития регионов Сибири является тот факт, что существующий цифровой разрыв сокращается как между СФО и другими федеральными округами, так и внутри самого округа между отдельными регионами, но все еще недостаточными темпами. Поэтому необходим механизм по сглаживанию цифрового неравенства в СФО.

Таблица 7. Ранжирование по рейтингу социально-экономического положения регионов (СЭПР) за 2019–2020 гг.

Регион	Расходы ИКТ на душу населения в 2020 г., руб.		Рейтинг СЭПР в 2019 г.		ВРП на душу населения в 2019 г., руб. (оценка)	
	руб.	место (в скобках — по РФ)	балл	место (в скобках — по РФ)	руб.	место
Красноярский край	422,7	8 (74)	61,554	1 (12)	809 434,1	1
Кемеровская область	667,2	4 (52)	52,35	2 (21)	476 495,8	4
Иркутская область	365,3	10 (82)	51,251	3 (22)	599 113,4	2
Новосибирская область	1240,7	3 (20)	51,167	4 (23)	460 653,3	6
Омская область	515,6	7 (69)	45,883	5 (32)	377 796,2	7
Алтайский край	566,3	6 (61)	41,974	6 (43)	245 695,0	8
Томская область	411,9	9 (76)	38,391	7 (49)	562 401,6	3
Республика Хакасия	657,2	5 (54)	26,279	8 (74)	462 373,6	5
Республика Алтай	1878,0	2 (12)	13,71	9 (83)	242 960,9	9
Республика Тыва	1909,3	1 (11)	13,174	10 (84)	220 984,3	10
Сибирский ФО	671,7	н.д.	39,57	6	501 514,8	н.д.
Российская Федерация	1447,3	–	42,7	–	578 740,0*	–

Примечание. В таблице «*» обозначены данные за 2018 г.

Источник: составлено авторами на основе данных («Сколково: Индекс “Цифровая Россия”»; Агентство CNEWS Analytics, Росстат: Регионы России).

Перечислим выявленные частные недостатки цифрового развития в СФО, а также общие, присущие всем регионам РФ.

1. Выделяется общий низкий уровень использования ИКТ и крайне низкая цифровизация в отдельных регионах округа (Республики Алтай и Тыва). Кроме того, эти республики, имея самый высокий удельный вес расходов на ИКТ на душу населения, остаются аутсайдерами в социально-экономическом развитии. Учитывая отставание в социально-экономическом развитии и невысокие показатели цифровизации, дополняет список наиболее ярких представителей цифрового разрыва в СФО Республика Хакасия и Алтайский край.

2. О наличии цифрового неравенства в СФО свидетельствуют следующие факты: округ занимает пятое место по уровню цифровизации среди восьми ФО, а отдельные регионы — места от десятого (Новосибирская область) до последнего, 85 (Республика Тыва). Средний уровень цифровизации по стране составляет 58,14 балла, соответственно, как минимум, четыре региона СФО отстают в цифровом развитии, а именно Алтайский край, Республика Алтай, Хакасия и Тыва, замыкающая рейтинг из всех 85 регионов. При этом среднее значение рейтинга по СФО также ниже общероссийского (56,00), что позволяет идентифицировать его как макрорегион, отстающий в цифровом развитии.

3. К числу недостатков современного развития ИКТ в России в целом можно причислить отсутствие в федеральных органах власти единой электронной базы по гражданам и организациям, включающей бы (в одном ресурсе) сведения о таких важнейших данных, как ГИБДД, налоговая служба (ФНС), банковские учреждения, ГУИН, органы ЗАГС, ПФР, медучреждения, страховые компании, социальные службы и службы занятости и т.п., несмотря на относительно успешное функционирование сайта Госуслуг, очередной стимул развития которого в 2020–2021 гг. дала пандемия коронавируса.

4. Государственная поддержка предприятий высокотехнологичных отраслей, создающих инновационную продукцию для цифровой экономики, осуществляется весьма слабо (Баженов, 2021, с. 65).

5. Не нашли должного развития ключевые сферы и направления цифровизации экономики и общества: электронное правительство, электронный бизнес, цифровое образование и медицина (Сошина, 2020, с. 31–39; Печаткин, 2020, с. 837–848),— хотя определенные решения в данном направлении, «благодаря»» пандемии коронавируса, конечно же, прослеживаются.

6. Проявляется цифровое неравенство между сельскими и городскими жителями, а усиление социального расслоения на богатых и бедных приводит к тому, что далеко не все учащиеся средних и высших учебных заведений получили возможность перейти на дистанционное обучение,

необходимость в котором выявила пандемия, а в перспективе это может привести к острому дефициту работников ряда специальностей, к снижению профессиональных компетенций будущих научных работников и, в конечном счете, обостряет проблему экономической безопасности регионов (Власов, 2020, с. 271–287).

7. Главный недостаток цифровизации СФО — дефицит финансирования. Показатель ИКТ-расходов на душу населения вдвое-втрое ниже среднего значения по стране. Почти всем регионам СФО, кроме трех, необходимо пересмотреть расходы ИКТ-бюджетов в сторону увеличения. Опыт других регионов показывает, что все вложения весьма эффективны, поэтому улучшение финансирования сферы ИКТ является важнейшим фактором обеспечения экономической безопасности региона в условиях цифровой экономики.

Все это свидетельствует о необходимости разработки комплексной программы по сглаживанию цифрового неравенства в СФО. Расширение степени цифровизации домохозяйств влечет за собой рост средних доходов и повышение уровня жизни населения за счет более простого и безболезненного перехода, в случае необходимости, на удаленный режим работы, не меняя своей дислокации.

Переходя к разработке предложений и рекомендаций по устранению цифрового неравенства, авторы считают важным сконцентрировать усилия на следующих приоритетных направлениях.

1. Образование и наука. Человеческий капитал в наше время не только ключевой фактор социально-экономического развития, но и обеспечения национальной безопасности. Вот почему научно-образовательные аспекты играют важную роль в реализации программ устранения цифрового неравенства. Фундаментальная наука и прикладные исследования в интересах развития высокотехнологических производств с использованием новейших цифровых технологий должны стать основным фактором обеспечения устойчивого экономического роста регионов (Сошина, 2020, с. 31–39). Доказательством этого служит тот факт, что Россия — одна из немногих, если не единственная, страна в мире, имеющая разработанный отечественными IT-специалистами полный арсенал высокотехнологичных решений для осуществления полноценной и безопасной деятельности в интернет-среде, включающий web-браузер, национальную поисковую систему и почтовые сервисы, систему предотвращения кибератак и антивирусные программы, социальные сети и мессенджеры.

2. Сельское население. Считаем необходимым запустить для сельчан программы цифрового просвещения, разъясняющие достоинства и возможности цифровой экономики, простоту и удобство получения различных услуг, включая государственные. Немаловажным является также обеспечение качественного доступа к ИКТ руководящих работников, специалистов и сотрудников администраций сельских поселений, зачастую не имеющих такой возможности ни дома, ни на рабочем месте.

3. «Умный регион». Еще в 2018 г. отмечалось, что именно проект «Умный регион», а не «Умный город», должен способствовать выравниванию цифрового неравенства[5], в чем авторы полностью согласны с экспертами. Преимущественное цифровое развитие всего региона, а не только урбанистических центров, должно быть положено в основу цифровизации всех регионов Сибири, включая самые удаленные.

Считаем необходимым предложить следующие мероприятия:

1) в области науки и образования — опережающая цифровизация всех учебных заведений и научно-исследовательских центров; введение дополнительных образовательных курсов по информационным технологиям и программ обучения цифровой грамотности для всех студентов и школьников; внедрение новых профильных программ по подготовке и повышению квалификации специалистов в области ИКТ; внедрение новых профильных программ по подготовке специалистов педагогических вузов с усиленным изучением основ ИКТ для использования в будущей педагогической практике;

2) в сельской местности — ускоренное преодоление цифровой неграмотности на селе через запуск соответствующих курсов для всех желающих, создание точек коллективного доступа, проведение бесплатных выездных семинаров ИТ-специалистов для сельских жителей; ускоренная разработка и реализация региональных программ устранения цифрового неравенства в отдаленных сельских районах;

3) реализация концепции «Умный регион», включающей такие подсистемы, как «Транспорт», «Полиция», «Образование», «Здравоохранение» и др. (Сколково: Индекс «Цифровая Россия», 2019),

[5] Эксперты: проект «Умный регион» поможет избежать увеличения цифрового неравенства в РФ. ТАСС. 11.07.2018 (https://tass.ru/ekonomika/5365267).

предполагающие расширенный цифровой формат предоставления и обмена информацией между пользователями и государственными и муниципальными структурами;

4) полномасштабное внедрение проекта «Электронное правительство»;

5) в области финансов — выделение дополнительного финансирования ИКТ-бюджетов регионов на цели, связанные с внедрением цифровых решений в отраслях промышленности, транспорта, связи, сферах социальной защиты, здравоохранения, науки, культуры и образования; целевое финансирование инновационных ИТ-разработок, в том числе с использованием грантов на перспективные исследования молодых специалистов; приоритетное финансирование информационно-коммуникационных технологий в междугородном транспорте, учитывая территориальную разобщенность территорий СФО.

Предлагаемый перечень мероприятий далеко не исчерпывающий, а вопросами его доработки, дополнения и конкретизации должны заняться профильные министерства и ведомства. Устранение цифрового неравенства будет способствовать обеспечению продовольственной и экономической безопасности региона. Переход агропроизводства и промышленности на технологии Индустрии 4.0 — следующий этап цифровизации, логически опирающийся на программу устранения цифрового неравенства. В недалеком будущем ускоренная цифровая трансформация отраслей промышленности (включая такие технологии, как искусственный интеллект, блокчейн, биг-дата, предиктивная аналитика и т.д.) благодаря экспорту техники и технологий сыграет самую значимую роль в экономическом развитии регионов (Попов, Семячков, 2018).

Авторы согласны с мнением ряда специалистов в том, что регионы, идущие по пути ускоренной цифровой трансформации, смогут более эффективно функционировать в современной экономической среде и быть более конкурентоспособными как на российском, так и международном рынках (Самаруха, Краснова, Плотникова, 2019). При разработке собственных программ и проектов цифровизации, очевидно, отстающие регионы должны опираться на опыт более успешных в плане цифровизации регионов, при этом должен быть реализован механизм «обмена лучшими практиками» (Бублик и др., 2018, с. 53; Батракова, 2019; Самаруха, Краснова, Плотникова, 2019). Реализация всех или хотя бы некоторых из предложенных мероприятий в СФО автоматически влечет за собой устойчивое экономическое развитие региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устойчивое экономическое развитие регионов — нетривиальная задача в условиях существенной территориальной раздробленности и дифференциации социально-экономического положения субъектов Федерации России, что наиболее ярко проявляется на примере Сибирского федерального округа, который включает неоднородные по площади, физическим и климатическим характеристикам территории, обладающие совершенно различными уровнями цифрового развития в силу особенностей своего географического положения.

Программы устранения цифрового неравенства должны быть направлены на повышение доступности ИКТ; снижение стоимости оборудования и услуг; увеличение удельного веса пользователей (уровня проникновения). Механизм сглаживания уровня цифрового неравенства должен, помимо вышеуказанного, обеспечить проникновение цифрового пространства в удаленные регионы и сельскую местность, параллельно обеспечивая рост общей цифровой грамотности населения.

Как показывает практика, механизм выравнивания, сглаживания уровня цифрового неравенства неизбежно влечет за собой рост экономической активности, повышение экономической безопасности регионов, роста их конкурентоспособности на локальном, общероссийском и мировом рынках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Баженов С.И. (2021). Цифровая трансформация экономической безопасности региона (на примере Свердловской области) // *Региональная экономика и управление: электронный научный журнал*. № 1 (65). С. 1–10. [**Bazhenov S.I.** (2021). Digital transformation of the economic security of the region (on the example of the Sverdlovsk region). *Regional Economics and Management: Electronic Scientific Journal,* 1 (65), 1–10 (in Russian).]

Батракова Л.Г. (2019). Развитие цифровой экономики в регионах России // *Социально-политические исследования*. № 1. С. 51–64. [**Batrakova L.G.** (2019). Development of the digital economy in the regions of Russia. *Social and Political Researches,* 1, 51–64 (in Russian).]

Бублик Н.Д., Лукина И.И., Чувилин Д.В., Шафиков Т.А., Юнусова Р.Ф. (2018). Развитие цифровой экономики в регионах России: проблемы и возможности (на примере Республики Башкортостан) // *Региональная экономика и управление: электронный научный журнал*. № 1 (53). С. 1–1. [**Bublik N.D., Lukina I.I., Chuvilin D.V., Shafikov T.A., Yunusova R.F.** (2018). Development of the digital economy in the regions of Russia: problems and opportunities (on the example of the Republic of Bashkortostan). *Regional Economics and Management: Electronic Scientific Journal,* 1 (53), 1–11 (in Russian).]

Власов М.В. (2020). Цифровая экономика как основное направление повышения уровня экономической безопасности региона (на примере субъектов Центрального федерального округа РФ) // *Вестник Пермского университета. Серия «Экономика»*. Т. 15 № 2. С. 271–287. [**Vlasov M.V.** (2020). Digital economy as the main direction of increasing the level of economic security of the region (on the example of the subjects of the Central Federal District of the Russian Federation). *Bulletin of Perm University. Series "Economics"*, 15, 2, 271–287 (in Russian).]

Гайнанов Д.А., Шарифьянов Т.Ф. (2014). Эволюция цифрового неравенства и инструментарий нейтрализации его последствий // *Региональная экономика: теория и практика*. № 22 (349). С. 2–18. [**Gainanov D.A., Sharifyanov T.F.** (2014). Evolution of digital inequality and tools for neutralizing its consequences. *Regional Economy: Theory and Practice,* 22 (349), 2–18 (in Russian).]

Дедюлина М.А. (2017). Цифровое неравенство: философское осмысление // *Studia Humanitatis*. № 2. С. 1–8. [**Dedyulina M.A.** (2017). Digital inequality: Philosophical understanding. *Studia Humanitatis*, 2, 1–8 (in Russian).]

Квасникова М.А. (2020). Цифровое неравенство и его влияние на социально-экономическое развитие регионов в России // *Социально-политические исследования*. № 1 (6). С. 43–58. [**Kvasnikova M.A.** (2020). Digital inequality and its impact on the socio-economic development of regions in Russia. *Social and Political Researches,* 1 (6), 43–58 (in Russian).]

Минаков А.В., Евраев Л.О. (2020). Потенциал и перспективы развития цифровой экономики регионов России // *Региональная экономика и управление: электронный научный журнал*. № 3 (63). С. 1–11. [**Minakov A.V., Evraev L.O.** (2020). Potential and prospects for the development of the digital economy of Russian regions. *Regional Economics and Management: Electronic Scientific Journal,* 3 (63), 1–11 (in Russian).]

Печаткин В.В. (2020). Формирование и развитие цифровой экономики в России как стратегический приоритет развития территорий в условиях пандемий // *Вопросы инновационной экономики*. Т. 10, № 2. С. 837–848. [**Pechatkin V.V.** (2020). Formation and development of the digital economy in Russia as a strategic priority for the development of territories in the context of pandemics. *Russian Journal of Innovation Economics,* 10, 2, 837–848 (in Russian).]

Попов Е.В., Семячков К.А. (2018). Проблемы экономической безопасности цифрового общества в условиях глобализации // *Экономика региона*. Т. 14, № 4. С. 1088–1101. [**Popov E.V., Semyachkov K.A.** (2018). Problems of economic security of digital society in the context of globalization. *Economy of the Region,* 14, 4, 1088–1101 (in Russian).]

Самаруха В.И., Краснова Т.Г., Плотникова Т.Н. (2019). Развитие цифровой экономики в России и регионах Сибирского федерального округа // *Известия Байкальского государственного университета*. Т. 29, № 3. С. 476–483. [**Samarukha V.I., Krasnova T.G., Plotnikova T.N.** (2019). Development of the digital economy in Russia and the regions of the Siberian Federal District. *Bulletin of the Baikal State University,* 29, 3, 476–483 (in Russian).]

Сошина О.Н. (2020). Основные проблемы обеспечения уровня экономической безопасности региона в цифровой экономике // *Экономика. Информатика*. Т. 47. № 1. С. 31–39. [**Soshina O.N.** (2020). The main problems of ensuring the level of economic security of the region in the digital economy. *Economics. Information Technologies,* 47, 1, 31–39 (in Russian).]

Шамсутдинова Т.М. (2019). Роль и место образования в преодолении цифрового неравенства (по материалам Республики Башкортостан) // *Регионология*. Т. 27, № 2. С. 330–353. [**Shamsutdinova T.M.** (2019). The role and place of education in overcoming digital inequality (based on the materials of the Republic of Bashkortostan). *Russian Journal of Regional Studies,* 27, 2, 330–353 (in Russian).]

Elements of correlation analysis in the assessment of digital inequality of some regions of Russia

© 2022 M.N. Dudin, S.V. Shkodinsky, D.I. Usmanov

M.N. Dudin,
Market Economy Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: dudinmn@mail.ru

S.V. Shkodinsky,
Market Economy Institute, Russian Academy of Sciences; Financial Research Institute, Moscow, Russia, e-mail: sh-serg@bk.ru

D.I. Usmanov,
Market Economy Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: us.dali@mail.ru

Received 20.04.2021

The article was prepared within the framework of the state task of the MEI RAS, the topic of research is "Institutional transformation of economic security in solving socio-economic problems of sustainable development of the national economy of Russia".

Abstract. Subject: specific socio-economic relations mediating the processes of digital inequality of the regions of the Siberian Federal District in the context of correlation analysis. The goal of research: conducting a comprehensive assessment and identifying the correlation between digitalization ratings and indicators of socio-economic development of Russian regions (according to the Siberian Federal District) in order to substantiate an effective mechanism for smoothing the regional level of digital inequality. The methodology is based on the principles, methods and approaches of correlation analysis, statistical methods of information processing, as well as on the analysis of secondary sources of information about the socio-economic situation of the region and the level of development of information and communication technologies in it. Results: the data on the presence of digital inequality in the regions of the Siberian Federal District were updated. The relationship between the level of development of information and communication technologies and the socio-economic situation of the territories is revealed, which determines the important role of eliminating the digital inequality in improving the economic security of the regions. The importance of increasing the ICT budgets of the regions of the Siberian Federal District is grounded. The study showed that successful experience in overcoming the digital divide includes measures aimed at: increasing the availability of ICT, increasing the penetration rate of digital services, increasing the share of competent ICT specialists. Conclusions: the use of elements of correlation analysis makes it possible to identify the cause-and-effect relationships of regional digital inequality, the task in conditions of significant territorial fragmentation and differentiation of the socio-economic situation of the constituent entities of the Russian Federation. Programs to bridge the digital divide should be backed by an appropriate mechanism to ensure the construction of network infrastructure and the penetration of the digital space into remote areas and rural areas, in parallel with the improvement of the general digital literacy of the population. As practice shows, the mechanism of leveling, smoothing the level of digital inequality inevitably entails an increase in economic activity, an increase in the economic security of regions, an increase in their competitiveness in the local, all-Russian and world markets.

Keywords: digitalization, socio-economic development, ICT, broadband access, digital divide.

JEL Classification: C40, R15.

Quoting: **Dudin M.N., Shkodinsky S.V., Usmanov D.I.** (2022). Elements of correlation analysis in the assessment of digital inequality of some regions of Russia. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 92–103. DOI: 10.31857/S042473880014670-6

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 104–112

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Понятие и типы сетевого капитала (на примере авиастроения)

© 2022 г. И.П. Комарова

И.П. Комарова,
ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», Москва, e-mail: Komarova.IP@rea.ru

Поступила в редакцию 14.09.2021

Аннотация. Функционирование сетевых форм экономического взаимодействия ведет к формированию и накоплению капитала особого рода — сетевого капитала — т.е. активов определенной степени специфичности, способных генерировать выгоды только в рамках данных сетевых структур. В статье выявлены основные типы сетевого капитала и условия их формирования. Определено, что переход к все более тесным и зависимым формам сетевого взаимодействия связан с аккумулированием большей величины и многообразия типов сетевого капитала. В зависимости от наличия определенных типов сетевого капитала, величины вложений в специфические активы, а также тесноты связей внутри сети выделены основные типы сетей — рыночные, партнерские, зависимые, клановые и иерархические. В качестве примера представлены основные типы сетевого капитала, сформированного в глобальных сетях авиастроительной отрасли. Определено, что центральный агент сети может одновременно входить в разные по тесноте связи и взаимозависимости, сетевые формы сотрудничества с различными компаниями, формируя при этом разные типы общего сетевого капитала. В качестве методологической основы исследования выступили неоклассическая и институциональная экономическая теории, теория контрактов, экономическая социология.

Ключевые слова: сеть, сетевой капитал, специфический актив, центральный агент, способ координации, глобальная цепочка создания стоимости, контракт, авиастроение.

Классификация JEL: D85, L14.

Цитирование: **Комарова И.П.** (2022). Понятие и типы сетевого капитала (на примере авиастроения) // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 104–112. DOI: 10.31857/S042473880018963-8

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сетевые формы экономического взаимодействия становятся доминирующими структурами мировой экономики. Конкурентоспособность как отдельных фирм, так и целых стран начинает зависеть от их позиций в сложившихся сетях создания стоимости. Вхождение экономических агентов в международные сети создания стоимости открывает возможности для реализации их экспортного потенциала, позволяет повысить производительность труда, улучшить качество продукции, приобрести новые навыки и компетенции, модернизировать производственные процессы, получить выгоды от экономии на масштабе производства. Эти выгоды характерны как для компаний-производителей конечной продукции, в частности китайских сборщиков электронной продукции, ставших впоследствии ведущими экспортерами в данной сфере, так и для производителей промежуточной продукции, в частности мексиканских производителей автокомпонентов, индийских производителей компонентов в сфере ИКТ.

Экономисты уделяют пристальное внимание вопросам сетевого взаимодействия на протяжении уже нескольких десятилетий.

Дж. Ричардсон в статье «Организация отрасли» одним из первых обратил внимание на распространение сетевых структур — «плотной сети сотрудничества и аффилиации, посредством которой фирмы взаимосвязаны»,— что объективно приводит к ограничению конкуренции (Richardson, 1972, p. 883).

Х. Уайт в работе «Откуда берутся рынки?» объясняет возникновение сетевых форм взаимодействия необходимостью повысить выживаемость на рынке: «...Фирмы ищут ниши на рынке примерно так же, как организмы ищут ниши в окружающей среде. Поскольку свои особенности есть у каждой фирмы, все они вовлечены не в чистую конкуренцию, а в деятельность, связанную с поиском и сохранением ролей по отношению друг с другом...» (White, 1981, p. 521).

В книге Р. Берта «Структурные пустоты: Социальная структура конкуренции» (Burt, 1995) отмечается, что различные контрагенты, не взаимодействующие между собой и принадлежащие к разным

сетям, могут объединяться в одной сети через центрального агента. Отсутствие связей между этими контрагентами порождает возникновение так называемых «структурных пустот» *(structural holes)*. Чем больше число структурных пустот, тем выше власть и координирующая роль агента, занимающего центральную позицию.

М. Портер в работе «Международная конкуренция. Конкурентные преимущества стран» указывает на выгоды сетевых форм взаимодействия: «Связи часто приводят к тому, что дополнительные затраты при “подгонке” отдельных видов деятельности друг к другу окупаются в дальнейшем... Тщательное управление связями может стать решающим источником конкурентного преимущества» (Портер, 1990, с. 116).

Среди российских ученых, занимающихся вопросами формирования и функционирования сетей создания стоимости, следует назвать В.Е. Дементьева, Е.В. Устюжанину, В.С. Катькало, Д.Е. Климанова, Ю.М. Третьяк, Е.А. Сидорову, М.Ю. Шерешеву и др.

В.С. Катькало одним из первых российских экономистов стал заниматься исследованием сетевых форм взаимодействия и выявил их специфические черты: «сетевые межфирменные структуры в отличие от дискретных рыночных сделок характеризуются долгосрочностью и многосторонностью связей между самостоятельными фирмами, что усиливает здесь цементирующую роль отношений, выходящих за рамки юридических...» (Катькало, 1990).

В.Е. Дементьев и Е.В. Устюжанина отмечают, что если базовым способом координации рыночных отношений является взаимодействие спроса и предложения независимых экономических агентов, регулируемое механизмом цен, а сопряжение деятельности внутри фирмы базируется на таком способе координации, как администрирование, то для сетевых отношений важнейшим является такой способ координации деятельности, как взаимное согласование (Дементьев, Устюжанина, Евсюков, 2018).

В.В. Радаев указывает, что в основе сетевого сотрудничества лежат отношения доверия — «сетевой подход основан на простой предпосылке: участники рынка, вступая в добровольный рыночный обмен, с большей вероятностью завязывают отношения с теми, с кем они имели дело ранее, убедившись в надежности уже известных им партнеров. При регулярно повторяющихся актах обмена для участника рынка становится важным опыт предыдущего взаимодействия» (Радаев, 2008, с. 48).

Как в зарубежных (Дж. Джереффи, Дж. Хамфри, Р. Болдуин и А. Венейблс), так и в отечественных исследованиях (Н. Попов, Ю. Третьяк, М. Шерешева) большое внимание уделяется вопросу классификации сетевых структур.

Классификация Болдуина–Венейблса (Baldwin, Venables, 2013) связана с распределением власти между участниками сетевого взаимодействия. Сети, построенные по типу сборочного конвейера, где все участники имеют близкие позиции и отсутствует ярко выраженное центральное звено, носят название «змеи». Сети, где центральный агент осуществляет координацию и контроль над деятельностью остальных участников взаимодействия, носят название «пауки». Кроме того, существуют различные конфигурации данных сетей — так называемые «гибриды» (Escaith, 2017).

Одна из широко известных классификаций предложена Дж. Джереффи, Дж. Хамфри и Т. Стёрджон (Gereffi, Humphrey, Sturgeon, 2005), которые выделяют пять видов сетевых форм отношений:

1) *долгосрочные рыночные отношения (markets)* (производство конечной продукции из стандартных комплектующих, уровень спецификации активов низкий, отношения между экономическими агентами строятся на принципах рыночного обмена);

2) *модульные сети (modular value chains)* (специальные требования к промежуточной продукции без вложений в специфические активы длительного пользования, участники сети специализируются на производстве отдельных блоков или модулей готового продукта);

3) *родственные сети (relational value chains)* (вложения в специфические активы длительного пользования, наличие отношенческих контрактов, взаимная зависимость участников сети может регулироваться репутацией, социальной и пространственной близостью, семейными и этническими связями);

4) *иерархия (hierarchy)* (наличие специфических знаний, интеллектуальной собственности);

5) *кептивные сети (captive value chains)* (зависимость поставщиков и подрядчиков от крупного заказчика, производство сложной продукции требует значительного вмешательства и контроля со стороны ведущей фирмы).

Следует отметить, что если критерием классификации первых четырех видов выступает уровень специфичности активов, то для выделения пятого вида используется другое основание — рыночная власть. На наш взгляд, именно *критерий специфичности вложений* может быть положен в основу классификации сетевых форм организации. Специфичность присутствует в любых сетях.

В рамках данной статьи поставлена задача ответить на следующие вопросы:

1) что такое сетевой капитал, почему он возникает и накапливается в сетевых структурах;

2) какие типы сетевого капитала существуют, каковы условия их формирования;

3) как сетевой капитал влияет на тесноту связей и взаимную зависимость участников сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Феномен сетевого капитала

Исследование сетевых форм взаимодействия позволяет говорить о феномене формирования *сетевого капитала* — совокупности активов определенной степени специфичности, характеризующихся длительностью существования и способностью генерировать выгоды в рамках конкретных сетевых структур. Формирование и накопление подобного капитала характерно не только для сетей высокотехнологичных отраслей — фармацевтики, компьютерных технологий, электронной техники, автомобилестроения, сферы финансовых и образовательных услуг, но и средне- и низкотехнологичных отраслей — пищевой, мебельной, легкой промышленности, транспортных услуг, грузоперевозок, сферы ритейла.

Говорить о том, что это абсолютно новая экономическая категория, было бы неточно.

Во-первых, многие исследователи подчеркивают, что в рамках межфирменных отношений происходит взаимодействие хозяйствующих субъектов с внешней средой (Zenger, Felin, Bigelow, 2011), результатом которого выступает формирование так называемого *партнёрского капитала* (Котляров, 2019). Как отмечает И.Д. Котляров, «ХС [хозяйствующий субъект] уже не владеет материальными производственными и сбытовыми активами, он контролирует свой партнёрский капитал, систему отношений с поставщиками необходимых ему ресурсов и компетенций» (Котляров, 2019, с. 461).

Во-вторых, во многих зарубежных исследованиях сетевых структур рассматривается близкое к сетевому понятие «социальный капитал» (social capital). П. Бурдье в своей работе «Формы капитала» (Bourdieu, 1986) определяет данную категорию как «совокупность реальных или потенциальных ресурсов, связанных с обладанием устойчивой сетью (durable networks), более или менее институционализированных отношений взаимного знакомства и признания — иными словами, с членством в группе... Эти отношения могут существовать... в форме материального и/или символического обмена, который способствует их поддержанию» (Bourdieu, 1986, p. 248–249). Исследователь выделил следующие свойства социального капитала:

1) объем социального капитала зависит от размера сети связей и от объёма капитала (экономического, культурного или символического), которым располагает каждый агент, входящий в сеть;

2) социальный капитал оказывает мультипликативное воздействие на капитал, которым уже обладает данный агент.

В работе (Robison, Schmid, Siles, 2002) авторы сравнивают свойства социального капитала с такими основными свойствами материальных капитальных благ, как способность к трансформации, долговечность, взаимозаменяемость, способность переходить из одной формы в другую, и приходят к выводу, что социальный капитал наделен такими же свойствами, что и физический капитал.

В работе (Viedma, 2003) автор рассматривает социальный капитал как разновидность интеллектуального капитала. Исследователь отмечает, что «компании создают устойчивые конкурентные преимущества, опираясь не только на свой внутренний интеллектуальный капитал, но и на интеллектуальный капитал других компаний, организаций и учреждений. Этот вид интеллектуального капитала, в основном внешнего, является одним из основных компонентов сетевой организации и носит название “социального капитала”» (Viedma, 2003, p. 501).

Во многом схожую позицию разделяют российские исследователи данной категории. Так, в соответствии с подходом Э.Р. Байбуриной, О.С. Жуковец, сетевой капитал представляет собой совокупность ключевых характеристик и синергетических эффектов, приобретаемых компанией от сетевых взаимодействий и ресурсных возможностей корпоративных сетей, ценность, приобретаемую

компанией от различных конфигураций корпоративного синергетического взаимодействия в основных и смежных отраслях (Байбурина, Жуковец, 2009, с. 134).

На наш взгляд, понятие сетевого капитала шире понятий интеллектуального и социального капитала. Сетевой капитал включает как материальные (специфические физические активы: станки, оборудование, совместные объекты инфраструктуры), так и нематериальные активы (межфирменные нормы взаимодействия, сложившиеся управленческие практики, общие неявные знания), характеризующиеся определенной степенью специфичности, длительностью существования и способностью генерировать выгоды в рамках конкретных сетевых структур.

Сети можно рассматривать как устойчивые группы формально независимых агентов, основанные на сложившихся длительных экономических связях, взаимном доверии и выгодности сотрудничества. В настоящее время можно выделить достаточно большое число типов специфического капитала, приобретаемого в рамках участия в сетях создания стоимости (Устюжанина, Евсюков, Комарова, 2019).

Сетевой капитал в авиастроении

Для любой сетевой структуры характерно наличие трех типов сетевого капитала — институционального, информационного и организационного.

Институциональный капитал представляет собой сложившиеся внутри сети межфирменные нормы взаимодействия, выработанные культурой взаимоотношений, наличием общих значений и взаимных ожиданий, которые служат основой совместной деятельности.

В качестве примера формирования такого капитала можно привести участие России в роли интегратора сети создания стоимости самолета Sukhoi SuperJet. В производстве воздушного судна принимали участие 30 предприятий из разных стран, которые поставляли на разных этапах различные узлы и компоненты: авионика — Thales (Франция), система управления и жизнеобеспечения — Liebherr (Германия), топливная система — Intertechnique (Zodiac) (Франция), интерьер и кислородная система — B/E Aerospace (США), кресла экипажа — Ipeco (Великобритания) и др.; общим консультантом по производству выступала компания Boeing (США).

Такое большое число участников объяснялось тем, что перед российскими производителями самолета стояла задача получения международной сертификации SSJ. Отечественные поставщики не были готовы предоставить комплектующие, сертифицированные по нормам EASA/FAA. В основу взаимодействия поставщиков и интегратора сети был заложен принцип «заказчик — наш партнер», в связи с чем разработка самолета осуществлялась в строгом соответствии с пожеланиями потенциальных заказчиков, входящих в консультационный совет («Аэрофлот», «Сибирь», «Utair Aviation»), «Air France», KLM, SAS, «Iberia», «Vietnam Airlines», «Газпром Авиа», «Azamat Airlines», «Brit Air» и др.), и модифицировалась под их запросы.

Информационный капитал характеризуется общими знаниями, используемыми в сетевом взаимодействии, например наличие уникальных наработанных в течение длительного времени баз данных, использование закрытых корпоративных информационных ресурсов.

В продолжение рассмотрения опыта производства Sukhoi SuperJet следует обратить внимание на то, что интегратор и его партнеры вели работу в единой базе данных на основе системы Teamcenter, включающей все 3D-модели и связанную с ними закрытую информацию, полностью описывающую самолет. Данная платформа предоставила возможность спроектировать самолет на основе так называемой «безбумажной» технологии. Система Teamcenter позволила скоординировать усилия около 1700 конструкторов на более чем восьми площадках за счет создания единого синхронизированного хранилища конструкторско-технологических знаний, позволяющего каждому участнику сети работать с единым источником данных для управления всеми конструкторскими изменениями в режиме реального времени.

Организационный капитал подразумевает специфические управленческие практики, используемые в конкретных сетях.

Как уже отмечалось, роль общего консультанта при производстве Sukhoi SuperJet выполняла компания «Boeing», которая внедрила свои отработанные поколениями управленческие практики, в частности так называемую *практику ворот* (gates), которая позволяет контролировать и оценивать ход реализации проекта по результатам в каждых таких «воротах».

Члены специальной комиссии, в состав которой входили представители «Boeing», готовили перечень замечаний по итогам проделанного этапа. Главная цель подобной процедуры — не пропустить недоработки на следующий этап, который характеризуется еще большими вложениями.

После первых «ворот» было принято решение разрабатывать новый самолет в привязке к семейству Boeing 737 и увязывать его с американскими компонентами. Однако по результатам встречи с авиакомпаниями (airlines advisory board) эта концепция была отвергнута — многие детали уже не соответствовали новым требованиям эргономики, в частности, критике подверглась кабина, спроектированная по образцу Boeing 737.

По результатам вторых «ворот» и встречи с потенциальными покупателями было принято решение модифицировать кокпит самолета, приблизив его к типу A320.

Итогами третьих «ворот» стала утвержденная конструкция самолета, с уточненными характеристиками и жесткими требованиями к поставщикам комплектующих. Система тендеров позволила отобрать ключевых поставщиков к четвертым «воротам». Если для российской практики дублирование поставщиков было нехарактерным, то «Boeing» настоял на конкуренции между поставщиками — участии, как минимум, двух компаний по каждому компоненту.

В отдельных сетях можно встретить и другие типы сетевого капитала. В частности, для сетей с четко выраженным центральным звеном и зависимыми от него участниками-сателлитами характерно наличие *технологического капитала*. Технологический капитал базируется на специфичности требований заказчика (центрального звена) к поставляемой промежуточной продукции. Рассмотрев требования основных участников международного рынка самолетостроения к поставщикам, можно обнаружить следующие примеры технологического капитала: чем выше уровень поставщика, тем большее значение играет технологический капитал (табл. 1).

В ответ на необходимость осуществления инвестиций в специфические активы длительного пользования формируется *физический капитал* — накопленные уникальные физические активы, используемые в рамках данной сети (машины, оборудование, необходимые

Таблица 1. Технологический капитал для разных уровней поставщиков на примере авиастроения

Уровень поставщика	Характеристика	Примеры поставок	Размеры технологического капитала
1	Поставщики систем / комплексов — компании, осуществляющие разработку, производство и сборку ключевых комплексов	Двигатели (турбовинтовые, турбореактивные, поршневые); агрегаты (гидравлическая система, топливная система, система энергоснабжения); авионика (системы коммуникации и связи, спутниковая навигационная система)	Наивысшая. Жесткая спецификация, любые изменения в параметрах комплексов согласуются OEM (original equipment manufacturer — финальными производителями воздушного судна)
2	Поставщики узлов — компании, осуществляющие сборку систем для поставщиков первого уровня	Узлы двигателей (вентилятор, турбина, компрессор, камера сгорания и др.); узлы агрегатов (воздушный винт, гидроцилиндр и др.); узлы авионики (активная фазированная антенная решетка и др.)	Высокая–средняя. Производство согласно документации, предоставляемой поставщиками первого уровня, в исключительных случаях — прямой контакт с OEM
3	Поставщики деталей и компонентов — компании, осуществляющие производство деталей для поставщиков первого и второго уровней	Детали двигателей (корпуса, лопатки турбины, шестерни и др.); детали агрегатов (кран, клапан, гидропровод и др.)	Средняя. Производство согласно документации, предоставляемой поставщиками первого и второго уровней, прямой контакт с OEM отсутствует
4	Поставщики услуг в области технологических процессов – производители, специализирующиеся на отдельных технологических процессах	Гальваника, механическая обработка, штамповка и др.	Средняя–низкая
	Поставщики сырья, материалов и стандартных изделий — производители широкого ряда продукции, имеющей кросс-отраслевое применение	Сплавы и композиты (титан, алюминий), специализированные стандартные изделия (метизы, резинотехнические изделия), микроэлектроника (транзисторы, диоды, резисторы)	Низкая

Источник: подготовлено автором на основе данных «Поставщики авиапрома: целевое состояние» (Минпромторг России, 2015, с. 15) (https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/2015_Postavshchiki_aviaproma._tselevoe_sostoyanie.pdf).

в производственном процессе данной сети и имеющие низкую альтернативную стоимость при других вариантах использования).

Глобальный рынок авиастроения является олигополистическим — более 95% рынка военной и гражданской авиации контролируют менее 20 OEM[1] — компания, которая производит детали и оборудование, которые могут быть проданы другим производителям под другой торговой маркой, хотя в начале 1960-х годов отрасль была представлена несколькими сотнями производителей, из которых только в США их было около 200[2]. Рыночная власть конечных производителей позволяет им предъявлять жесткие требования к поставщикам, вынуждая их осуществлять инвестиции в специфические активы. Это обуславливает необходимость формирования альянсов для поставщиков первого уровня. В двигателестроении примерами подобных альянсов выступают альянсы «CFM International» и «Engine Alliance», «Snecma» и НПО «Сатурн».

В условиях все возрастающей технологической сложности и стоимости проектов поставщики первого уровня активно внедряют контракты с разделением рисков (во многих случаях не только рисков, но и последующей выручки от продаж). В качестве примера можно привести проект разработки двигателя Pure Power PW1000G компании «Pratt and Whitney». Компания GKN осуществила капитальные затраты для создания вала двигателя, компания ITP инвестировала в разработку выходного патрубка турбины, JAEC отвечала за компрессор низкого давления, MTU — за компрессор высокого давления.

Защитой от оппортунистического поведения как заказчиков, так и поставщиков (со стороны OEM — риск запирания поставщика в отношения с OEM, со стороны поставщика — проблема морального риска и отказ от удовлетворения требований OEM в отношении поставляемых компонентов) выступают отношенческие контракты — совместное инвестирование и распределение прибыли ex post.

Еще одним типом сетевого капитала выступает *территориальный капитал*, обусловленный специфичностью местоположения и невозможностью перемещения части активов, используемых участниками сетевого взаимодействия для создания стоимости.

Для глобального рынка авиастроения примерами обусловленных специфичностью местоположения активов выступают центры технического обслуживания и ремонта авиационной техники (ТОиР — центры технического обслуживания и ремонта).

Одной из причин сложного хода реализации программы SSJ100 является отсутствие выстроенной сети послепродажного обслуживания самолетов. Напротив, ключевым конкурентным преимуществом «Airbus» выступает развитая сеть центров ТОиР, призванная обеспечить доступность обслуживания и ремонта самолетов во всем мире в непосредственной близости от эксплуатантов. Помимо развитой сети данных центров, «Airbus» имеет широкую сеть складов запасных частей, что значительно экономит время на доставку вышедших из строя компонентов заказчикам.

Некоторые сети характеризуются наличием таких типов сетевого капитала, как когнитивный, социальный и интеллектуальный виды капиталы.

Когнитивный капитал представлен совместными неявными знаниями о процессах производства и обращения. Введенный М. Поланьи термин «*неявное знание*» (*tacit knowledge*) относится к такому виду знаний, которое не может быть легко передано другим, т.е. полностью или частично не формализовано.

Авиастроение — как одна из наиболее высокотехнологичных областей — отличается сложными процессами, которые базируются как на прежнем накопленном опыте, так и принципиально новых идеях и технологиях.

Например, при стыковке секций фюзеляжа необходимо ставить специальные заклепки, число и место крепления которых определяют конструкторы. До того как Политехнический университет Санкт-Петербурга по заказу «Airbus» разработал специальную программу, которая позволяет рассчитывать, где при стыковке секций ставить заклепки и сколько их необходимо, чтобы распределение веса было более эффективным, подобные знания можно было отнести к категории неявных.

Еще одним примером неявного знания может выступать проведение предполетного осмотра готового самолета перед запуском. Для подобной процедуры требуется около восьми часов работы и несколько высококвалифицированных экспертов, обладающих многолетней практикой и сформированными на

[1] Original equipment manufacturer — оригинальный производитель оборудования — компания, которая производит детали и оборудование, которые могут быть проданы другим производителям под другой торговой маркой.

[2] См. (Минпромторг России, 2015, с. 13) .

ее основе неявными знаниями об эксплуатации авиационной техники. Компания «Airbus» запустила специальную программу, связанную с проведением осмотра самолета с помощью дронов за 15 минут. Данная программа значительно экономит время осмотра, однако анализ полученных данных невозможен без участия экспертов.

Социальный капитал включает связи отдельных участников сети с внешними заинтересованными сторонами (стейкхолдерами). Получению сертификата европейского агентства по авиационной безопасности EASA на самолет Sukhoi Superjet 100, подтверждающего соответствие самолета действующим требованиям EASA к летной годности и воздействию на окружающую среду, способствовали долгосрочные контракты с ключевыми европейскими поставщиками — компаниями «Aerospace Thales», «Liebherr», «Messier-Bugatti-Dowty», «Snecma» и др. Очевидно, что транспортное средство было обязано отвечать всем необходимым критериям агентства, однако получение данного сертификата еще в далеком 2012 г. многие связывали в том числе и со связями ведущих европейских компаний—участников данной сети.

Одним из способов накопления социального капитала в рамках сети является локализация определенных этапов цепочки создания стоимости в зарубежных странах. Так, благодаря созданию производственных и сборочных производств на территории Китая компания «Airbus» смогла получить один из крупнейших заказов на поставку самолетов в 2014 г. (более 100 судов за 10,2 млрд долл.).

Интеллектуальный капитал связан с результатами вложений в исследования и разработки участниками сетевого взаимодействия.

Значительное увеличение затрат на НИОКР и сопряженные с ним растущие риски ведения бизнеса приводят к необходимости консолидации усилий участников сетевого взаимодействия в проведении исследований и разработок.

Примером может выступать совместно накопленный интеллектуальный капитал французского производителя двигателей SAFRAN и российских компаний авиаиндустрии.

Таблица 2. Типы сетей и соответствующие им типы сетевого капитала

Сети			Тип сетевого капитала									
Тип	Описание сети	Ведущий способ координации	Институциональный капитал	Информационный капитал	Организационный капитал	Когнитивный капитал	Территориальный капитал	Технологический капитал	Физический капитал	Социальный капитал	Интеллектуальный капитал	Теснота связи в сети
Рыночные	Основаны на длительности отношений, доверии, единых нормах и ожиданиях	Ценовая и нормативная координация	+	+	+							Низкая/ средняя
Партнерские	Преобладание неформальных норм над формальными	Взаимное согласование и внутренние стандарты	+	+	+	+	+/–					Средняя
Зависимые	Наличие специальных требований к промежуточной продукции без вложений в специфические активы длительного пользования	Взаимное согласование	+	+	+	+	+/–	+				Высокая
Клановые	Вложение в специфические активы длительного пользования	Взаимное согласование	+	+	+	+	+/–	+	+	+/–	+/–	Наивысшая
Иерархические	Вложение в специфические активы и экономическая власть одного из участников сетевого взаимодействия.	Административная и совещательная координация	+	+	+	+	+/–	+	+	+/–	+/–	Наивысшая

Группа французских компаний SAFRAN ведет отсчет совместному научному взаимодействию с российскими предприятиями авиационной и космической отрасли с 1989 г. Совместная научная работа стала проводиться в сфере ракетных, вертолетных и самолетных двигателей. В 2001 г. компания «Snecma» из группы «SAFRAN» совместно с НПО «Сатурн» начали работы, направленные на создание двигателя для нового российского регионального самолета (RRJ, будущий SuperJet 100). В 2003 г. «Сухой» выбрал двигатель SaM146, предложенный «Snecma» и НПО «Сатурн» для регионального самолета SuperJet 100.

Сети характеризуются наличием различных типов общего сетевого капитала, что обуславливает устойчивость связей между участниками сетевого взаимодействия, а также способы управления совместной деятельностью. Необходимо отметить, что большое влияние на способы управления могут оказать и другие факторы. Компании-партнеры могут обладать различной силой на переговорах как в отношениях друг с другом, так и в отношениях с фирмой-интегратором вследствие своей монопольной позиции; контроля над редкими ресурсами, в том числе знаниями; контроля над входом на рынок; возможностью обеспечения эффекта масштаба. В зависимости от наличия определенных типов сетевого капитала, размеров вложений в специфические активы, а также тесноты связей внутри сети, можно выделить следующие типы сетей (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход от одного типа сети к другому связан с аккумулированием все большей величины и многообразия типов сетевого капитала. Очевидно, что чем больше типов сетевого капитала формируется в рамках сетей, тем теснее связи между участниками сетевого взаимодействия и выше их взаимная зависимость. Однако центральный агент (компания-интегратор) может одновременно входить в разные по тесноте связи и взаимозависимости сетевые формы сотрудничества с различными компаниями, формируя при этом разные типы общего сетевого капитала. Образно говоря, как у отдельно взятого индивида могут одновременно быть приятельские, дружеские, партнерские и родственные связи с разными индивидами, так и у компании-интегратора могут одновременно формироваться рыночные, зависимые, иерархические и другие сети с разными партнерами. Рассмотренный в статье пример компании-интегратора Sukhoi Superjet 100 доказывает возможность выстраивания различных типов сетей с разными компаниями-партнерами. Например, с поставщиками стандартных узлов и простых компонентов (такими как производители кресел для экипажа «Ipeco», шасси «Goodrich») компания-интегратор входит в рыночную сеть; с поставщиками ключевых компонентов, например авионики («Thales»), — в зависимые сети; с компаниями, осуществляющими вложения в специфические активы, например с разработчиками двигателей (SAFRAN «Snecma» и НПО «Сатурн»), — в клановые сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Байбурина Э.Р., Жуковец О.С. (2009). Концепция анализа сетевого капитала как драйвера стоимости компании // *Корпоративные финансы*. Вып. 4 (12). С. 130–144. [**Bayburina E.R., Zhukovets O.S.** (2009). Network capital analytic lens: Moving towards the concept of the value drivers. *Journal of Corporate Finance Research,* 4 (12), 130–144 (in Russian).]

Дементьев В.Е., Устюжанина Е.В., Евсюков С.Г. (2018). Цифровая трансформация цепочек создания ценности: «улыбка» может оказаться «хмурой» // *Журнал институциональных исследований*. Т. 10. № 4. С. 58–77. [**Dementiev V.E., Ustyuzhanina E.V., Evsukov S.G.** (2018). Digital transformation of value chains: “smail curve” can become “scowling”. *Journal of Institutional Studies,* 10, 4, 58–77 (in Russian).]

Катькало В.С. (1990). Межфирменные сети: проблематика исследований новой организационной стратегии в 1980 и 90-е годы // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Сер. 5. Вып. 2 (№ 12). Режим доступа: https://mognovse.ru/zge-ekonomika-zarubejnih-stran.html [**Katkalo V.S.** (1990). Inter-company networks: problems of research of a new organizational strategy in the 1980-s and 90-s. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*, 2, 12. Available at: https://mognovse.ru/zge-ekonomika-zarubejnih-stran.html (in Russian).]

Котляров И.Д. (2019). Трансформация фирмы: переход к «облачной» системе создания и присвоения стоимости // *Журнал экономической теории*. Т. 16. № 3. С. 454–467. [**Kotliarov I.D.** (2019). Firm transformation: Transition to a “cloud” system of value creation and value capture. *The Journal of Economic Theory,* 16, 3, 454–467 (in Russian).]

Портер М. (1990). Международная конкуренция. Конкурентные преимущества стран. М.: Альпина Диджитал. 84 с. [**Porter M.** (1990). *The competitive advantage of nations.* Moscow: Alpina Digital. 84 p. (in Russian).]

Поставщики авиапрома: целевое состояние (2015) // *Минпромторг России*. Режим доступа: https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/2015_Postavshchiki_aviaproma._tselevoe_sostoyanie.pdf [Suppliers of the aviation

industry: The target state (2015). *Ministry of Industry and Trade of Russia*. Available at: https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/2015_Postavshchiki_aviaproma._tselevoe_sostoyanie.pdf (in Russian).]

Радаев В.В. (2008). Рынок как переплетение социальных сетей // *Российский журнал менеджмента*. Т. 6. № 2. С. 47–54. [**Radaev V.V.** (2008). The market as an interweaving of social networks. *Russian Management Journal*, 6, 2, 47–54 (in Russian).]

Устюжанина Е.В., Евсюков С.Г., Комарова И.П. (2019). Сети создания стоимости: проблемы формирования и управления // *Менеджмент и бизнес-администрирование*. № 3. С. 132–150. [**Ustyuzhanina E.V., Evsukov S.G., Komarova I.P.** (2019). Value chains: Problems of formation and governance. *Management and Business Administration,* 3, 132–150 (in Russian).]

Baldwin R., Venables A.J. (2013). Spiders and snakes: Offshoring and agglomeration in the global economy. *Journal of International Economics*, 90 (2), 245–254. DOI: 10.1016/j.jinteco.2013.02.005

Bourdieu P. (1986). The forms of capital. J. Richardson. *Handbook of Theory and Research for the Sociology of Education*. Westport: Greenwood, 241–258.

Burt R.S. (1995). Structural holes: The social structure of competition. Cambridge: Harvard University Press. 324 p.

Escaith H. (2017). Accumulated trade costs and their impact on domestic and international value chains. Chapter 4. In: World Bank et al. *Measuring and analyzing the impact of GVCs on economic development*. Washington: World Bank. Available at: http://www.worldbank.org/en/topic/trade/publication/global-value-chaindevelopment-report-measuring-and-analyzing-the-impact-of-gvcs-on-economic-development

Gereffi G., Humphrey J., Sturgeon T. (2005). The governance of global value chain. *Review of International Political Economy*, February, 12 (1), 78–104.

Richardson G.B. (1972). The organisation of industry. *The Economic Journal*, 82, 883–896.

Robison L.J., Schmid A.A., Siles M.E. (2002). Is social capital really capital? *Review of Social Economy*, 60 (1), February, 1–21.

Viedma J.-M. (2003). Capital benchmarking system — profiting from social capital when building network organisations. *Journal of Intellectual Capital*, January, 9 (3), 501–509.

White H. (1981). Where do markets come from? *The American Journal of Sociology*, 87 (3), 517–547. Available at: www.jstor.org/stable/2778933

Zenger T.R., Felin T., Bigelow L. (2011). Theories of the firm-market boundary. *The Academy of Management Annals,* 5, 1, 89–133.

The concept and types of network capital (example of aircraft industry)

© 2022 I.P. Komarova

I.P. Komarova,
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia, e-mail: Komarova.IP@rea.ru

Received 14.09.2021

Abstract. The functioning of network forms of economic interaction leads to the formation and accumulation of special kind of capital — network capital — assets of a certain degree of specificity, capable of generating benefits only within the framework of these network structures. The article identifies the main types of network capital and the conditions for their formation. It is determined that the transition to increasingly close and dependent forms of network interactions is associated with the accumulation of a greater value and variety of network capital types. Depending on the availability of certain types of network capital, the amount of investment in specific assets, as well as the tightness of connections within the network, the main types of networks are identified — market, partner, dependent, clan and hierarchical networks. As an example, the main types of network capital formed in the global value chains of the aircraft industry are presented. It has been determined that the central agent of a network can simultaneously enter into network forms of cooperation with different companies,— different in terms of tightness and interdependence, while forming different types of total network capital. Neoclassical and institutional economic theories, theory of contracts, economic sociology were used as the methodological basis of the research.

Keywords: network, network capital, specific asset, central agent, method of coordination, global value chain, contract, aircraft industry.

JEL Classification: D85, L14.

Quoting: **I.P. Komarova** (2022). The concept and types of network capital (example of aircraft industry). *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 104–112. DOI: 10.31857/S042473880018963-8

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 113–130

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Агентное моделирование социально-экономических последствий миграции при государственном регулировании занятости

© 2022 г. В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Г.Л. Бекларян, А.С. Акопов, Е.А. Ровенская, Н.В. Стрелковский

В.Л. Макаров,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru

А.Р. Бахтизин,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

Г.Л. Бекларян,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: glbeklaryan@gmail.com

А.С. Акопов,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: akopovas@umail.ru

Е.А. Ровенская,
Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА), Лаксенбург, Австрия; МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; e-mail: rovenska@iiasa.ac.at

Н.В. Стрелковский,
Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА), Лаксенбург, Австрия; e-mail: strelkon@iiasa.ac.at

Поступила в редакцию 16.11.2021

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18–51–14010 АНФ_а).

Аннотация. В статье представлен подход к моделированию социально-экономических последствий миграции на основе расширенной модели взаимодействия мигрантов с коренными жителями, в которой регулирующая функция государства состоит в централизованном создании новых рабочих мест, различающихся уровнем «технологической отдачи» (т.е. производительности труда, зависящей от отраслевой принадлежности формируемых рабочих мест). Предлагаемый в статье подход основан на ранее предложенной модели взаимодействия мигрантов с коренными жителями и ориентирован на исследование социально-экономических последствий миграции в системе с более сложной регулирующей функцией государства, создающего низко- и высокотехнологичные рабочие места, соответственно привлекательные для мигрантов и коренных жителей. При создании рабочих мест агент-государство руководствуется двумя возможными стратегиями: создание кластерно-ориентированных рабочих мест в зонах высокой концентрации мигрантов и коренных жителей и равномерно распределенных рабочих мест с целью увеличения частоты взаимодействий между агентами различных классов и снижения уровня сегрегации населения. При этом особое внимание уделяется процессам ассимиляции, временные характеристики которой зависят от уровня сегрегации исследуемых сообществ, государственных инвестиций в образование и интеграцию и др. В предложенной модели учитывается влияние различных управляющих параметров, в частности, влияние уровня толерантности на выбор агентом места локации в условиях ограниченного соседства, влияние уровня образования на размерность области поиска нового рабочего места и другие важные характеристики, отражающие особенности поведения членов исследуемых сообществ. При этом социально-экономические последствия миграции исследуются при различных сценарных условиях, в частности, различающихся по паттернам поведения агентов, принадлежащих рассматриваемым сообществам, темпам притока новых мигрантов, уровню государственных расходов на образование и др.

Ключевые слова: агентное моделирование миграции, государственное регулирование занятости, социально-экономические последствия миграции, AnyLogic.

Классификация JEL: C02, C63, F22, J11, J61.

Цитирование: **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В.** (2022). Агентное моделирование социально-экономических последствий миграции при государственном регулировании занятости // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 113–130. DOI: 10.31857/S042473880018960-5

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие страны сталкиваются с последствиями, вызванными миграционными процессами. Такие проблемы, как языковой барьер, культурные и образовательные различия между коренными жителями и мигрантами, существенная дифференциация в паттернах поведения местного и внешнего сообществ имеют, как правило, негативные социально-экономические последствия, проявляющиеся в виде роста социальной напряженности и увеличения финансовой нагрузки на бюджетную систему (Bove, Elia, 2017). Миграция, однако, является важным фактором обеспечения устойчивого экономического роста, особенно в странах с низким уровнем рождаемости, испытывающих дефицит трудовых ресурсов. Подобное противоречие может быть разрешено, если государством будут созданы условия, обеспечивающие существенное снижение времени, необходимого для ассимиляции и интеграции мигрантов. Как показывают многочисленные исследования, существует связь между уровнем владения государственным языком, возможностями получения высшего образования и скоростью ассимиляции (Dudley, Lieberson, 1959; Bleakley, Chin, 2010; Bacolod, Rangel, 2017). Если сообщество агентов-мигрантов сильно сегрегировано и не имеет полноценных и частых контактов с коренными жителями, то нет и условий для повышения уровня владения государственным языком, сокращения имеющихся культурных различий между мигрантами и коренными жителями, получения более качественного образования и т.д. Многие исследования, основанные на моделях ограниченного соседства типа Шеллинга (Schelling, 1971; Бреер, 2016), также подтверждают необходимость минимизации уровня популяционной сегрегации. И хотя члены изолированной популяции могут чувствовать себя более комфортно и безопасно, как, в частности, показано в известной модели «кочевников» и «землепашцев» (Белоусов, 2017), для социально-экономической системы в целом подобная сегрегация несет риски существенного увеличения времени, необходимого для ассимиляции и интеграции, что в долгосрочной перспективе может привести к депопуляции коренного населения в условиях превалирующей рождаемости в среде мигрантов. При этом у государства имеется широкий набор инструментов миграционной и социально-экономической политики: от жесткого ограничения миграционных потоков и борьбы с сегрегацией до государственной поддержки миграции.

Сложность формирования рациональной миграционной политики во многом обусловлена необходимостью поиска компромиссных решений, учитывающих интересы различных агентов: коренного населения, мигрантов и государства. Оба класса агентов–жителей страны (мигранты и коренные жители) вносят вклад в экономический рост (Макаров, Бахтизин, Бекларян и др., 2020). Во многих странах агенты-мигранты ориентируются преимущественно на низкотехнологичные рабочие места, относящиеся в основном к сфере нефинансовых услуг, розничной и оптовой торговли, малоинтенсивному сельскому хозяйству, добыче сырья и др. (Pew Research Center, 2020). Агенты–коренные жители предпочитают преимущественно высокотехнологичные рабочие места, в частности, включающие отрасли финансовых (банковских) услуг, сектор высоких технологий (high-tech, IT), отрасли перерабатывающей промышленности и др. Высокотехнологичные рабочие места характеризуются высоким уровнем фондоотдачи и существенным вкладом в динамику ВВП, однако они требуют привлечения высококвалифицированных трудовых ресурсов. При этом государство может формировать рабочие места в местах компактного проживания агентов определенного типа (менее затратный кластерно-ориентированный подход) либо равномерно, т.е. комбинируя рабочие места различных типов в местах проживания обоих классов агентов (более затратный равномерно-смешанный подход) (Kain, 1969).

Цель данной статьи состоит в исследовании социально-экономических последствий миграции при государственном регулировании рынка занятости, т.е. при кластерно-ориентированном и равномерно-смешанном подходах к формированию рабочих мест, а также с учетом влияния множественных факторов на пространственную динамику агентов (в частности, уровня образования, толерантности по отношению к соседям и др.) с помощью расширенной агент-ориентированной модели взаимодействия мигрантов с коренными жителями. Предлагаемая модель реализована в системе имитационного моделирования *AnyLogic* (Borshchev, 2013; Акопов, 2014).

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Итак, рассматривается искусственная социально-экономическая система, состоящая из представителей коренного и внешнего населения (т.е. мигрантов), взаимодействующих друг с другом. В отличие от модели, разработанной ранее (Макаров, Бахтизин, Бекларян и др., 2020), в которой необходимые ресурсы (рабочие места) создавались самими агентами, здесь рассматривается система с государственным регулированием рынка трудовых ресурсов, т.е. с централизованным созданием рабочих мест. Другим важным отличием является эндогенность времени, необходимого для ассимиляции агентов-мигрантов и зависящего от уровня владения государственным языком, уровня образования и т.д. И наконец, в новой модели предлагается учитывать влияние уровня образования на размерность области поиска нового рабочего места, а также уровня толерантности по отношению к соседям при выборе целевого местоположения агента среди имеющихся альтернатив (Urselmans, Phelps, 2018).

Взаимодействия между рассматриваемыми популяциями моделируются в двумерном дискретном пространстве с размерностью *dim* x *dim*, состоящем из отдельных ячеек, которые ограничивают как число доступных рабочих мест, так и размеры популяций агентов соответственно. В подобном дискретном пространстве агент может занимать только одну ячейку с рабочим местом или без него в каждый момент времени. Как и ранее, в модели обеспечивается наличие *высокотехнологичных* и *низкотехнологичных* рабочих мест, на которые нацелены коренные жители и мигранты соответственно. Оба типа рабочих мест обеспечивают занимающих их агентов ростом уровня личного комфорта[1]. Представители коренного населения получают меньшую прибавку к уровню комфорта, если они заняты в низкотехнологичных отраслях экономики. Также на уровень их личного комфорта влияет соседство с агентами-мигрантами, контакты с которыми немного снижают этот уровень (Gorodzeisky, Semyonov, 2019). На выбор целевого рабочего места влияет уровень толерантности агентов по отношению к соседям — чем выше этот уровень, тем в большей степени агент готов соседствовать с агентами, принадлежащими к другому типу (например, работать коренному жителю в окружении мигрантов). Подобный параметр широко используется в моделях ограниченного соседства типа Шеллинга и моделях толерантного порогового поведения Грановеттера (Granovetter, 1978).

Агент-государство создает трудовые ресурсы с использованием двух различных стратегий:

– *кластерно-ориентированные рабочие места,* что предполагает формирование как высокотехнологичных, так и низкотехнологичных рабочих мест в областях с высокой концентрацией коренных жителей и мигрантов соответственно. Данный подход является наименее затратным для государства, но может создать дефицит рабочих мест для агентов, снизить уровень их личного комфорта и сократить численность популяции вследствие снижения рождаемости. Для формирования кластеров рабочих мест используется известный алгоритм нечеткой кластеризации (Bezdek, 1974, 1981; Beklaryan, Akopov, 2016);

– *равномерно-смешанные рабочие места,* что предполагает формирование трудовых ресурсов обоих типов равномерным и случайным образом во всех свободных ячейках дискретного пространства с разными вероятностями, заданными для высокотехнологичных и низкотехнологичных рабочих мест соответственно (Dekking, 2005). Данный подход является наиболее затратным для государства, но может предотвратить возникновение дефицита рабочих мест, что особенно важно при высоких темпах миграции, а также благоприятно влияет на частоту контактов между мигрантами и коренными жителями, сокращая время, необходимое для ассимиляции.

На возможности поиска нового рабочего места также влияет уровень образования агента (Lavrinovicha, Lavrinenko, Teivans-Treinovskis, 2015). С ростом данного уровня увеличивается размерность пространства поиска рабочего места. В свою очередь, уровень образования агента зависит от уровня владения местным языком и затратами государства на одного обучающегося.

Таким образом, стратегии формирования рабочих влияют на число и продолжительность контактов между агентами-мигрантами и коренными жителями, что с учетом государственных расходов на образование обеспечивает необходимые темпы ассимиляции и интеграции. Вклад высокотехнологичных и низкотехнологичных рабочих мест, занятых, как правило, коренными жителями и мигрантами соответственно, в темпы экономического роста (например, ВВП) и государственные

[1] В рассматриваемой модели личный комфорт является синтетическим показателем, который включает доходы, ощущение личной безопасности, самореализацию и т.д.

трансферты (ГТ) различаются. Производительность труда (как и фондоотдача), определяемая как отношение ВВП к единице трудовых ресурсов в высокотехнологичных отраслях экономики, значительно выше по сравнению с низкотехнологичными. При этом создание низкотехнологичных рабочих мест обуславливает дополнительные государственные трансферты из-за концентрации соответствующих отраслей в государственном секторе занятости (Sabot, 1982; Jean et al., 2010).

В рассматриваемой системе обеспечивается приток мигрантов с последующей трансформацией прибывающих агентов в коренных жителей по истечении срока, необходимого на ассимиляцию (в диапазоне от 5 до 30 лет). Приток новых мигрантов обусловлен «гравитационным эффектом» (Макаров и др., 2019), т.е. имеющейся разницей в уровне жизни страны эмиграции и иммиграции. Также принимается во внимание усиливающаяся обратная связь — чем больше имеется неассимилированных мигрантов, тем больше новых мигрантов прибывает в следующий момент времени.

Важной характеристикой индивидуальной системы принятия решений агента является встроенный механизм поиска ближайшего рабочего места (с учетом влияния уровня образования и толерантности по отношению к соседям) или партнера для брака и рождения детей в зависимости от характеристик агента (например, его возраста, семейного статуса, уровня личного комфорта и др.). Если агент не удовлетворен, т.е. уровень его личного комфорта ниже порогового, и при этом находится в трудоспособном возрасте, является безработным и др., то он ищет рабочее место. В случае достаточного уровня личного комфорта, детородного возраста и др. агент ищет партнера для брака и создания семьи.

При этом рождение детей возможно (с большей вероятностью) как в полных семьях детородного возраста, так и в неполных (с существенно меньшей вероятностью).

На рис. 1 показан общий алгоритм поведения агента на примере агента-мигранта, иллюстрирующий его возможные состояния и переходы между ними, реализуемые при выполнении определенных условий.

В модели для каждого агента определены следующие состояния: «*стационарное состояние*», «*состояние поиска рабочего места*», «*состояние поиска партнера*», «*состояние готовности иметь детей*»

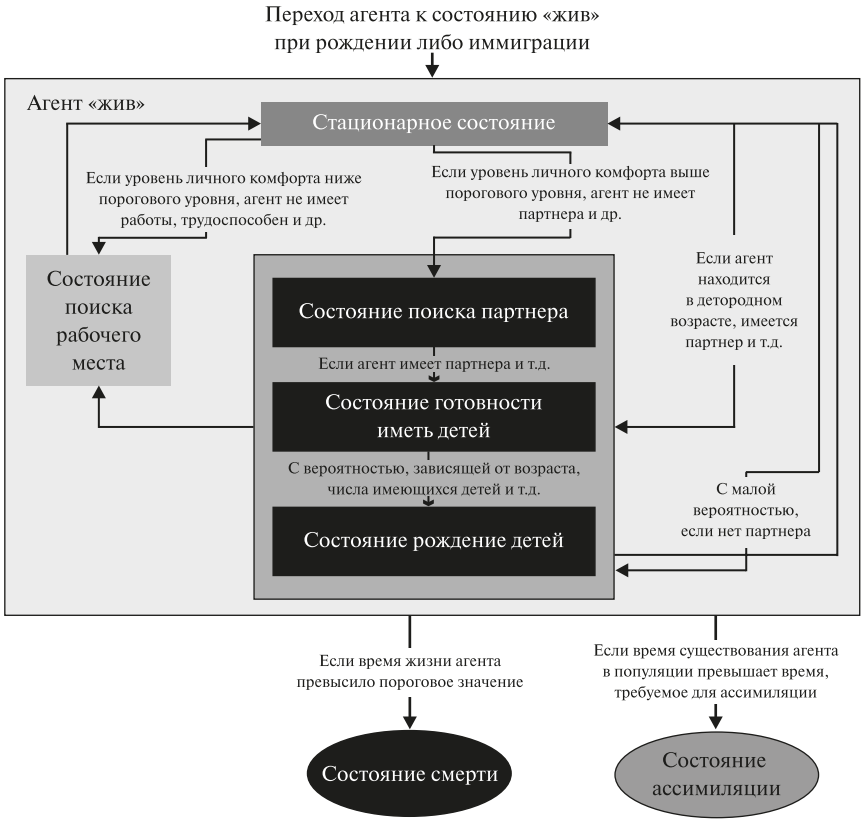


Рис. 1. Алгоритм поведения агента на примере агента-мигранта

и т.д. (см. рис. 1). В отличие от мигрантов агенты–коренные жители не имеют состояния «ассимиляция». Кроме того, у коренных жителей другие (более высокие) значения пороговых характеристик (например, минимальный средний возраст вступления в брак и рождения детей, минимальный уровень личного комфорта и т.д.), обусловленные паттерном их поведения, существенно отличающимся от мигрантов.

Агент может находиться в стационарном состоянии, если, например, он уже женат, имеет работу, после рождения детей, после достижения пенсионного возраста и т.д.

В зависимости от своего текущего состояния каждый агент либо неподвижен, либо перемещается к целевым ячейкам дискретного пространства, содержащим рабочие места или других агентов, один из которых может стать его партнером. При этом каждая оцениваемая агентом ячейка дискретного пространства также может находиться в одном из следующих состояний: *ячейка, свободная от ресурса*, если она не содержит рабочего места, *ячейка, содержащая низкотехнологичное рабочее место*, и *ячейка, содержащая высокотехнологичное рабочее место*. Таким образом, если ячейка дискретного пространства с рабочим местом занята агентом, положительный вклад в экономический рост будет зависеть от типа ресурса, так как высокотехнологичные рабочие места приносят бóльшую отдачу. Напротив, если ячейка дискретного пространства не имеет трудовых ресурсов и занята каким-либо агентом, негативное влияние будет наблюдаться из-за роста государственных трансфертов (например, пособий по безработице) и потери добавленной стоимости, которая создается, если ресурс занят агентом. В то же время, если агент занимает ячейку без трудового ресурса, уровень его личного комфорта снижается, что может ограничивать его возможности найти партнера и заводить детей.

Далее будет дано краткое описание наиболее важных характеристик расширенной модели реакции мигрантов и коренных жителей на государственное регулирование занятости. Формальное описание базовой модели с децентрализованным созданием рабочих мест и экзогенным временем ассимиляции представлено в работе (Макаров и др., 2020).

Пусть T — множество моментов времени (по годам); $|T|$ — общее число моментов времени; $t_0 \in T$ и $t_{|T|} \in T$ — начальный и конечный моменты времени; $t_k \in T$ — все моменты времени; $I = \{1,\ldots,|I|\}$ — набор индексов агентов–коренных жителей, где $|I|$ общее число агентов–коренных жителей; $\tilde{I} = \{1,\ldots,|\tilde{I}|\}$ — набор индексов агентов-мигрантов, где $|\tilde{I}|$ — общее число агентов-мигрантов.

Уровень владения местным (государственным) языком агентом-мигрантом $\tilde{i}$ ($\tilde{i} \in \tilde{I}$), зависящий от числа контактов между агентами различных типов в момент времени $t_k \in T$:

$$\tilde{l}_{\tilde{i}}(t_k) = \sum_{k=t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^{|I|} contacts_{\tilde{i}i}(\xi_k), \quad \xi_k \in T, \tag{1}$$

$$contacts_{\tilde{i}i}(\xi_k) = \begin{cases} 0, \text{ если } \{x_i(\xi_k),\, y_i(\xi_k)\} \in M_{\tilde{i}}(\xi_k), \\ 1, \text{ если } \{x_i(\xi_k),\, y_i(\xi_k)\} \notin M_{\tilde{i}}(\xi_k), \end{cases} \tag{2}$$

$$\tilde{i} \in \tilde{I},\, i \in I,\, t_k, \xi_k \in T,$$

где $\{x_i(\xi_k),\, y_i(\xi_k)\}$, $i \in I$, $\xi_k \in T$ — координаты агента–коренного жителя i в двумерном дискретном пространстве (рис. 2); $M_{\tilde{i}}(\xi_k)$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$, $\xi_k \in T$ — множество координат, принадлежащих ячейкам, являющимся соседними для агента-мигранта $\tilde{i}$ (8-клеточное Мурово соседство) в момент времени ξ_k.

Уровень образования агента i ($i \in I \cup \tilde{I}$), зависящий от уровня владения языком и государственных расходов на образование в момент времени $t_k \in T$:

$$e_i(t_k) = \bar{e} \exp\left(-1 / \left[\eta(t_k) GDP(t_k)\left(1 + l_i(t_k)\right)\right]\right), \tag{3}$$

где $l_i(t_k)$, $i \in I \cup \tilde{I}$, $t_k \in T$ — уровень владения языком агента i; $\bar{e}$ — верхний предел уровня

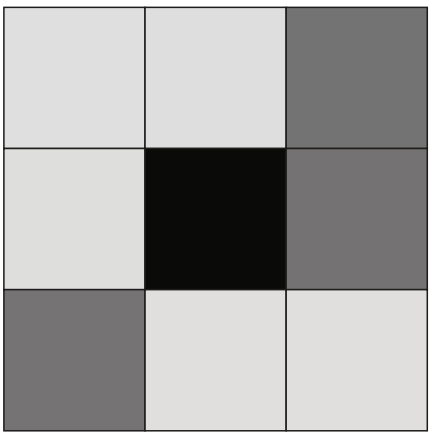


Рис. 2. Соседние клетки агента-мигранта, влияющие на его контакты

Примечание. Пример ограниченного соседства: 8 соседних ячеек обеспечивают агента-мигранта тремя контактами.

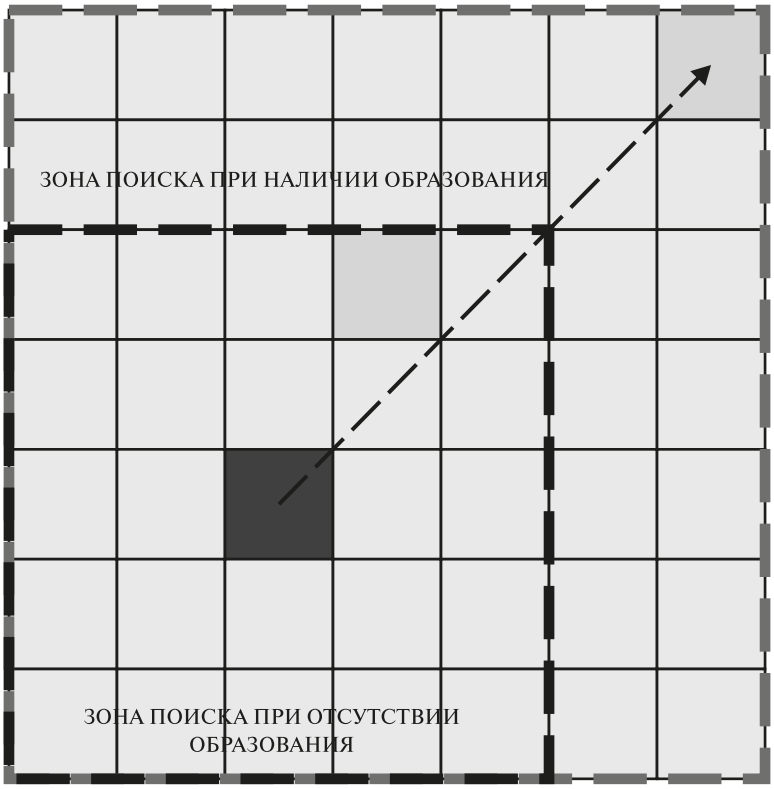


Рис. 3. Влияние уровня образования на размерность области поиска рабочего места

образования; $\eta(t_k) \in [0,\ 1]$ — доля государственных расходов на образование в валовом внутреннем продукте ($GDP(t_k)$) на одного обучающегося.

Время, требуемое на ассимиляцию агента-мигранта $\tilde{i}$ ($\tilde{i} \in \tilde{I}$), зависящее от уровня владения языком и образования в момент времени $t_k \in T$:

$$\tilde{\xi}_{\tilde{i}}(t_k) = \tilde{A}\left(\frac{1}{1+\tilde{l}_{\tilde{i}}(t_k)}\right)^{v_1}\left(\frac{1}{1+\tilde{e}_{\tilde{i}}(t_k)}\right)^{v_2}, \tag{4}$$

где $\tilde{A}$ — общее число лет, необходимых иммигранту при отсутствии знания языка и образования (30 лет), $v_1,\ v_2 \in [0,\ 1]$ — коэффициенты значимости: $v_1 + v_2 = 1$.

Размерность области поиска рабочего места для агента i ($i \in I \cup \tilde{I}$), зависящая от уровня образования в момент времени $t_k \in T$:

$$dim \times dim = \left(2S_i(t_k)+1\right)\times\left(2S_i(t_k)+1\right)-1, \tag{5}$$

$$S_i(t_k) = \underline{S} + \lambda Be_i(t_k), \tag{6}$$

где $\underline{S}$ — минимальное количество ячеек области поиска рабочего места, заданное во всех направлениях дискретного пространства, при отсутствии образования (рис. 3); $\lambda \in [0,\ 1]$ — коэффициент влияния уровня образования на размерность области поиска рабочего места (*управляющий параметр*); B — константа ($\tilde{B} = 10$).

Координаты целевой ячейки для агента i ($i \in I \bigcup \tilde{I}$) *в дискретном пространстве,* состоящем из R строк и C столбцов и содержащем наиболее предпочтительное рабочее место в момент времени $t_k \in T$:

$$Cell_i^*(t_k;\ \hat{r},\ \hat{c}) = \arg\min_{r\in R,\ c\in C}\left(d_i(t_k;\ r,\ c) + \rho_i(t_k;\ r,\ c)(1-\gamma)\right), \tag{7}$$

$$d_i(t_k;\ r,\ c) = \sqrt{\left(x_i(t_k)-r\right)^2 + \left(y_i(t_k)-c\right)^2}, \tag{8}$$

$$\rho_i(t_k;\ r,\ c) = \sum_{\tilde{r}=r-\tilde{S}}^{r+\tilde{S}}\sum_{\tilde{c}=c-\tilde{S}}^{c+\tilde{S}} m_i(t_k;\ \hat{r},\ \hat{c}), \tag{9}$$

$$m_i(t_k;\ \hat{r},\ \hat{c}) = \begin{cases} 1, \text{ если выполняется условие } I, \\ 0, \text{ если выполняется условие } II. \end{cases} \tag{10}$$

Условие I.

$$\left(i \in I\ 8\ \exists\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}_{i\in\tilde{I}} \in \{Cell_i(t_k;\ \hat{r},\ \hat{c})\}_{i\in I}\right) \text{ или}$$
$$\left(i \in \tilde{I}\ 8\ \exists\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}_{i\in I} \in \{Cell_i(t_k;\ \hat{r},\ \hat{c})\}_{i\in\tilde{I}}\right).$$

Условие II.

$$\left(i \in I\ 8\ \{x_i(t_k), y_i(t_k)\}_{i\in\tilde{I}} \notin \{Cell_i(t_k;\ \hat{r},\ \hat{c})\}_{i\in I}\ \forall\ i \in \tilde{I}\right) \text{ или}$$
$$\left(i \in \tilde{I}\ 8\ \{x_i(t_k), y_i(t_k)\}_{i\in I} \notin \{Cell_i(t_k;\ \hat{r},\ \hat{c})\}_{i\in\tilde{I}}\ \forall\ i \in I\right),$$

где $d_i(t_k;\ r,\ c)$, $i \in I \bigcup \tilde{I}$, $t_k \in T$ — Евклидово расстояние между агентом i с координатами $\{x_i(t_k),\ y_i(t_k)\}$ и ячейкой, содержащей рабочее место $Cell_i(t_k;\ r,\ c)$, релевантное для агента i (т.е. высокотехнологичное для коренного жителя и низкотехнологичное для мигранта) в момент времени t_k; $\rho_i(t_k;\ r,\ c)$, $i \in I \bigcup \tilde{I}$, $t_k \in T$ — суммарное число агентов, принадлежащих к другому типу и входящих в пространство соседства агента i, ограниченного размерностью $(2\tilde{S}+1)\times(2\tilde{S}+1)-1$ в момент времени t_k; $Cell_i(t_k;\ \hat{r},\ \hat{c})$, $i \in I \bigcup \tilde{I}$ — координаты ячеек, входящих в область соседства агента i в момент времени t_k; $\gamma \in [0,\ 1]$ — уровень толерантности агентов по отношению к агентам противоположного типа: $\gamma = 0$ — агенты полностью нетолерантны; $\gamma = 1$ — агенты полностью толерантны (*управляющий параметр модели*) (рис. 4).

Таким образом, агент находит клетку, которая находится на минимальном расстоянии от него (см. уравнение (8)) и имеет наименьший штраф за наличие соседей другого типа в заданной окрестности (см. уравнение (9)). Важность второго требования при принятии решения определяется уровнем толерантности (см. уравнение (7)). Условие I означает, что в окрестности данного агента–коренного жителя находится агент-мигрант либо в окрестности данного агента-мигранта находится агент–коренной житель. Условие II означает, что в окрестности данного агента–коренного жителя нет агентов-мигрантов либо в окрестности данного агента-мигранта нет агентов–коренных жителей.

Индекс сегрегации Дункана для системы, описывающей популяционную динамику мигрантов и коренных жителей (Duncan O., Duncan B., 1955):

$$DSI(t_k) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{|J|}\left|\frac{n_j(t_k)}{|I|} - \frac{\tilde{n}_j(t_k)}{|\tilde{I}|}\right|, \tag{11}$$

где $J = \{1,\ldots,\ |J|\}$ — набор индексов областей, на которые поделено дискретное пространство существования агентов; где $|J|$ — общее число оцениваемых окрестностей в дискретном пространстве

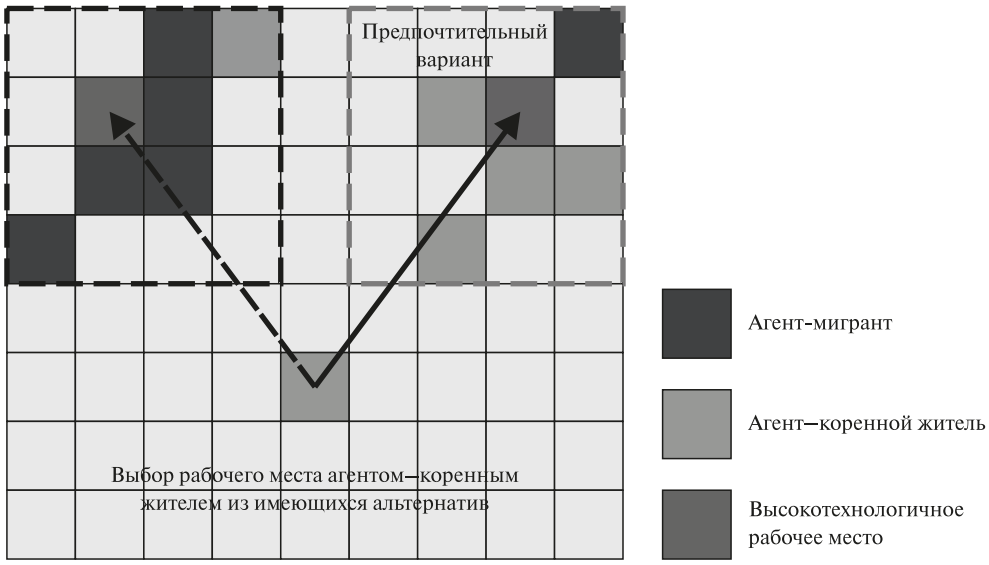


Рис. 4. Влияние уровня толерантности на выбор агентом рабочего места

размещения агентов; $n_j(t_k)$, $j \in J$, $t_k \in T$ — число агентов–коренных жителей, расположенных в окрестности j; $\tilde{n}_j(t_k)$, $j \in J$, $t_k \in T$ — число агентов-мигрантов, расположенных в окрестности j.

Все остальные показатели модели, в том числе численность коренного населения и мигрантов, темпы роста ВВП, размер государственных трансфертов и прочие характеристики вычисляются так же, как и базовой модели (Макаров и др., 2020).

Далее с использованием системы AnyLogic была выполнена программная реализация предложенной модели и выполнены численные эксперименты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Далее, с использованием разработанной имитационной модели исследованы различные сценарии развития социально-экономической системы, состоящей из двух взаимодействующих популяций: агентов–коренных жителей и агентов-мигрантов с учетом эффекта сегрегации и влияния государственной регулирующей политики рынка занятости. Все имитационные эксперименты проводятся на временном горизонте в 80 шагов модельного времени (лет). Важной целью подобных экспериментов является изучение влияния эффектов сегрегации. Для каждого из изучаемых сценариев выбирается два возможных способа создания новых рабочих мест: 1 — *кластерно-ориентированный подход*; 2 — *равномерно-смешанный подход.* Каждый сценарий имеет нумерацию «№ .№ » (т.е. «Номер сценария», «Способ создания рабочих мест»)

Итак, рассматриваются следующие сценарии (табл. 1).

Сценарий 1.1–1.2. Базовый сценарий. Предполагается сохранение «текущих» паттернов поведения коренных жителей и мигрантов, в рамках которых агенты–коренные жители предпочитают жениться и заводить детей в более позднем возрасте (после 29 лет) в условиях высокого минимального уровня личного комфорта (6 ед.). При этом доля новых агентов-мигрантов — 8% в год, влияние уровня толерантности и образования на поиск рабочих мест — 0,5.

Сценарий 2.1–2.2. Неограниченная и неконтролируемая миграция. При этом сценарии значительно увеличивается доля новых агентов-мигрантов в популяции агентов, иммигрировавших ранее (до 25% в год). При этом государство сокращает расходы на ассимиляцию и интеграцию, в частности, доля государственных расходов на образование в ВВП на душу населения снижается до 10% (вместо 20% в базовом сценарии). Кроме того, паттерны поведения коренных жителей и мигрантов не меняются. При этом уровень толерантности — 0, влияние уровня образования — 1.

Сценарий 3.1–3.2. Минимальная миграция. Сценарий предполагает радикальное снижение доли новых агентов-мигрантов (до 1% в год) при сохранении всех остальных значений управляющих параметров. При этом уровень толерантности — 1, влияние уровня образования — 0.

Сценарий 4.1–4.2. Трансформация моделей поведения агентов. Сценарий направлен на изучение влияния структурной трансформации паттернов поведения агентов в условиях выравнивания предпочтений агентов–коренных жителей и агентов-мигрантов в отношении возраста вступления в брак и рождения детей, перехода к равным значениям минимальных уровней личного комфорта и других характеристик агентов (т.е. «коренные жители копируют паттерн поведения мигрантов»).

Таблица 1. Различные сценарии симуляции и соответствующие им значения параметров модели

Сценарий		Значения различающихся параметров			
Код	Интерпретация	Доля новых агентов-мигрантов (от числа уже находящихся в модели мигрантов), %	Доля государственных расходов на образование (от ВВП на душу населения), %	Уровень толерантности агентов по отношению к соседям	Влияние уровня образования на размерность области поиска рабочего места
1.1–1.2	Базовый сценарий	8	20	0,5	0,5
2.1–2.2	Неограниченная и неконтролируемая миграция	25	10	0	1
3.1–3.2	Минимальная миграция	1	20	1	0
4.1–4.2	Трансформация моделей поведения агентов	15	50	0,5	0,5

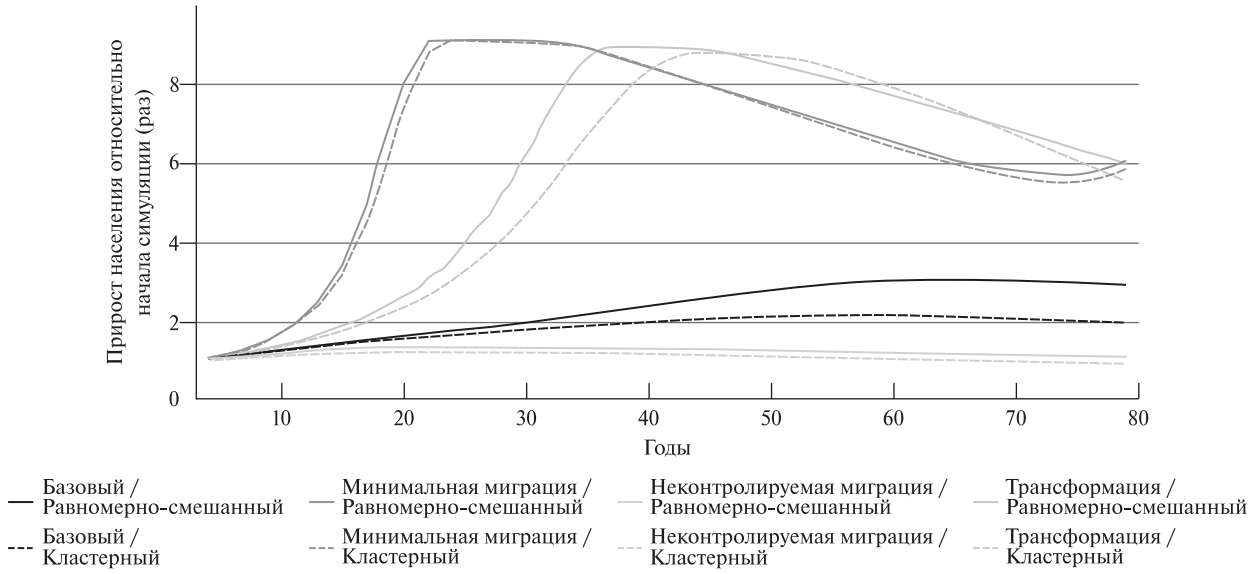


Рис. 5. Численность населения с учетом ассимилированных агентов-мигрантов

Кроме того, доля новых агентов-мигрантов в популяции агентов, иммигрировавших ранее, увеличивается до 15%, чтобы обеспечить сильный приток новых мигрантов. В то же время государство увеличивает расходы на ассимиляцию и интеграцию, в частности, доля государственных расходов на образование в ВВП на душу населения (одного обучающегося) увеличивается до 50%. При этом влияние уровня толерантности и образования на поиск рабочих мест — 0,5.

Для учета случайных процессов, происходящих в модели, для каждого сценария было выполнено 30 прогонов с одинаковыми значениями начальных параметров, но с различными значениями генератора случайных чисел (Lee et al., 2015). Полученные результаты представлены на рис. 5–10. На всех рисунках показанные траектории отображают усредненные значения прогонов модели в рамках каждого сценария.

На рис. 5 отображено изменение суммарной численности агентов в модели относительно начального числа агентов. Параметры модели подобраны таким образом, что во всех сценариях наблюдается рост численности населения как за счет миграции, так и за счет естественного прироста. Для сценариев с более интенсивной миграцией рост населения, очевидно, происходит быстрее. Отметим две интересные особенности:

i) для всех сценариев изначальный рост населения происходит быстрее при равномерно-смешанном способе создания рабочих мест;

ii) в сценариях с высокими уровнями миграции (2 и 4) при достижении определенного числа агентов численность населения начинает снижаться. Первый феномен может быть объяснен более низким уровнем комфорта среди агентов при кластерно-ориентированном способе создания рабочих мест, что приводит к снижению вероятности создания семьи и рождения детей. Вторая особенность наблюдается, вероятно, из-за высокой конкуренции за рабочие места, которая ведет к тому, что не все агенты могут найти соответствующее их типу рабочее место и, следовательно, уровень их комфорта падает, что ведет к снижению рождаемости. При этом численность населения снижается за счет естественной убыли.

На рис. 6 отображена динамика доли (неассимилированных) мигрантов среди всего населения. В базовом сценарии доля мигрантов меняется на протяжении симуляции слабо. В сценарии минимальной миграции доля мигрантов плавно убывает практически до нулевых значений. В сценарии неограниченной и неконтролируемой миграции доля мигрантов достигает 70%, а затем быстро снижается за счет ассимиляции и естественной убыли населения (продолжительность жизни мигрантов предполагается меньшей, чем коренных жителей). При этом через некоторое время доля мигрантов снова начинает стремительно расти. В сценарии трансформации моделей поведения агентов также наблюдается рост доли мигрантов, однако он более плавный и доля мигрантов не превосходит 40%, а затем начинает снижаться вследствие ассимиляции. Тип создания рабочих мест не оказывает принципиального воздействия на долю мигрантов; лишь в сценарии трансформации

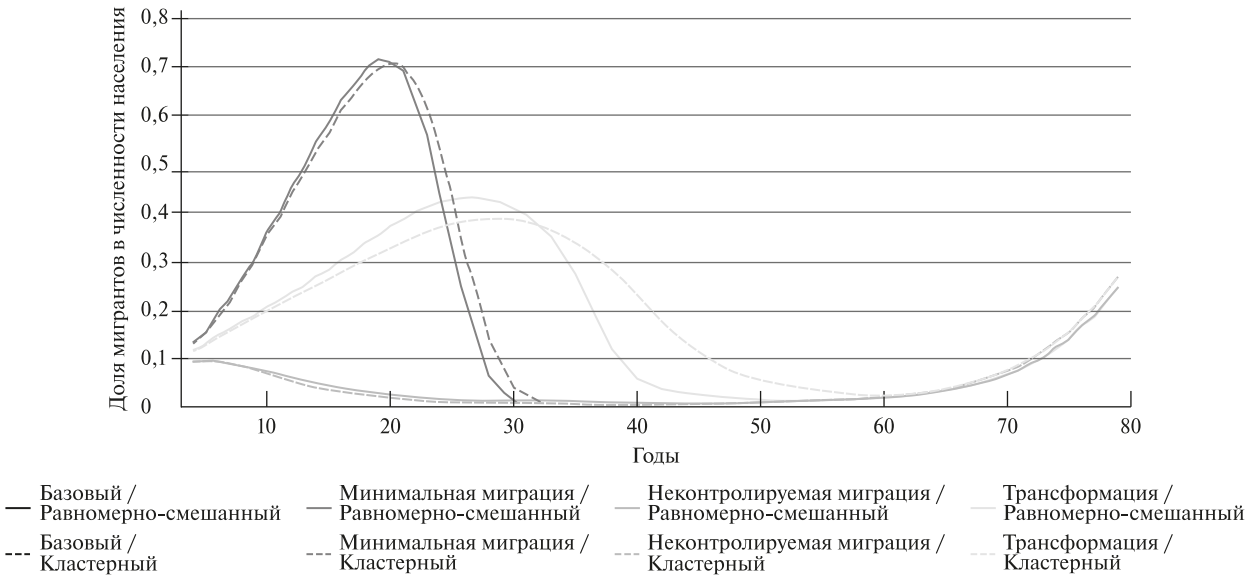


Рис. 6. Доля мигрантов в численности населения

кластерно-ориентированный тип создания рабочих мест ведет к более плавной динамике изменения доли мигрантов.

На рис. 7 представлена динамика среднего времени, необходимого для ассимиляции мигрантов. В базовом сценарии эта величина остается примерно постоянной на протяжении всей симуляции (15 лет). В сценарии минимальной миграции время, необходимое для ассимиляции мигрантов, сначала растет, а затем снижается. Данный феномен может быть обусловлен низкой плотностью населения в данном сценарии (рис. 7) и, как следствие, снижением числа контактов между мигрантами и коренными жителями. Формируются изолированные «гетто», состоящие из одиночных агентов-мигрантов. Как только они ассимилируются, снижение числа новых мигрантов положительно влияет на среднее время ассимиляции. В сценариях с более высокой интенсивностью миграции после начального периода стабилизации наблюдается снижение среднего времени, требуемого на ассимиляцию,— в сценарии трансформации на первом этапе это происходит в основном за счет высоких государственных расходов на образование (интеграцию), а в сценарии

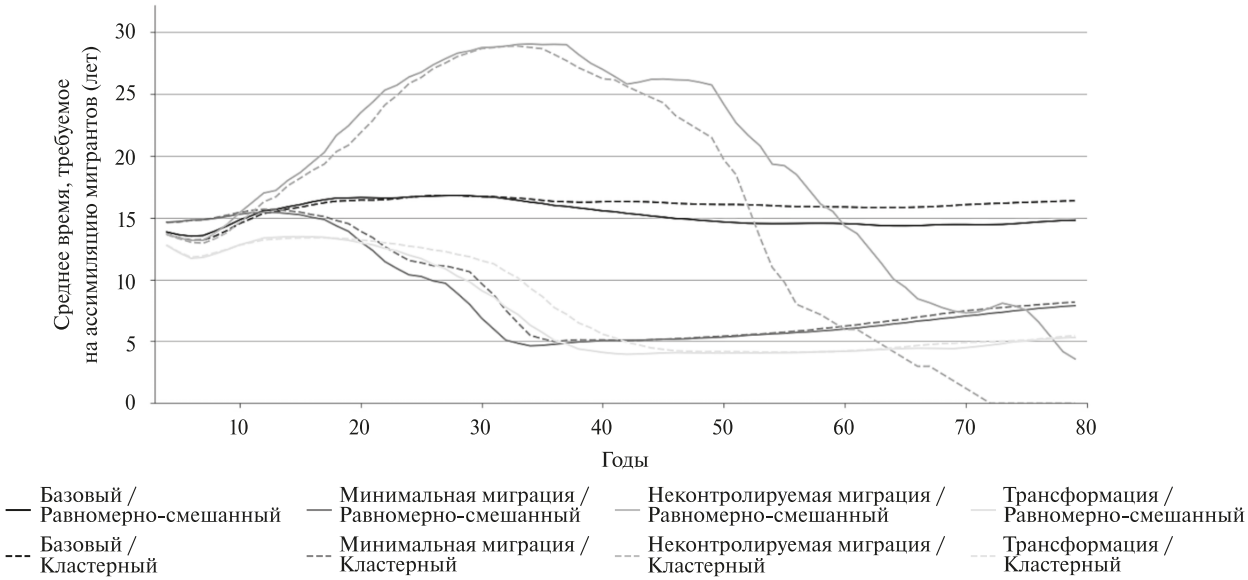


Рис. 7. Среднее время, требуемое на ассимиляцию мигрантов

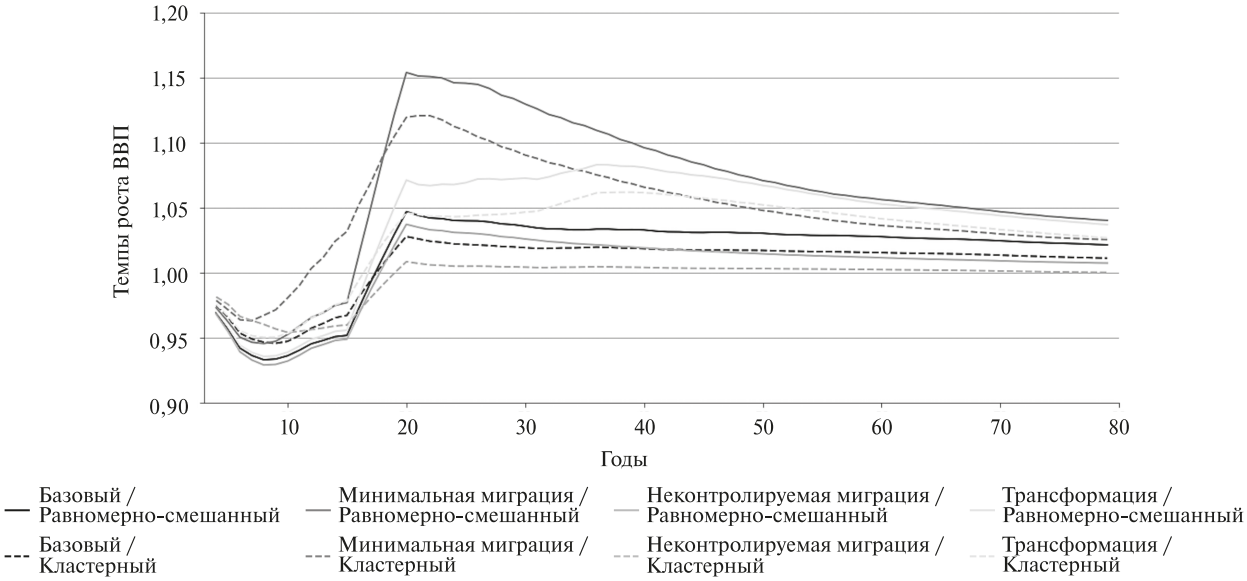


Рис. 8. Темпы роста ВВП

неконтролируемой миграции — за счет высокой плотности населения и того факта, что контакты с уже ассимилированными мигрантами (эквивалентные контактам с коренными жителями) помогают неассимилированным быстрее овладеть местным языком. За исключением сценария минимальной миграции тип создания рабочих мест несущественно влияет на наблюдаемые траектории.

На рис. 8 отображена динамика темпов роста ВВП. После некоторого изначального спада рост ВВП наблюдается во всех сценариях, при этом наиболее интенсивный — в сценариях с наибольшей интенсивностью миграции. Отметим, что в данный период кластерно-ориентированный способ создания рабочих мест ведет к более быстрому росту. Однако затем, когда наблюдается замедление темпов роста (вызванное снижением численности населения, см. рис. 5), равномерно-смешанный способ оказывается более выгодным.

На рис. 9 отображена динамика государственных расходов. Их объем напрямую связан с интенсивностью миграции — данный феномен связан с необходимостью выплаты большого числа

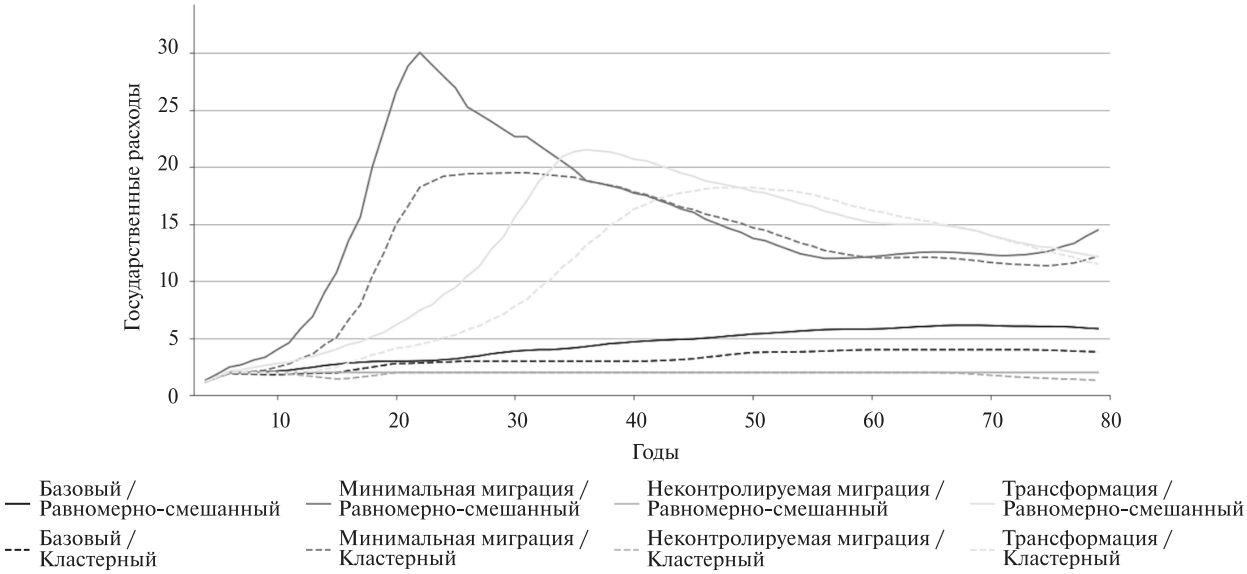


Рис. 9. Государственные расходы

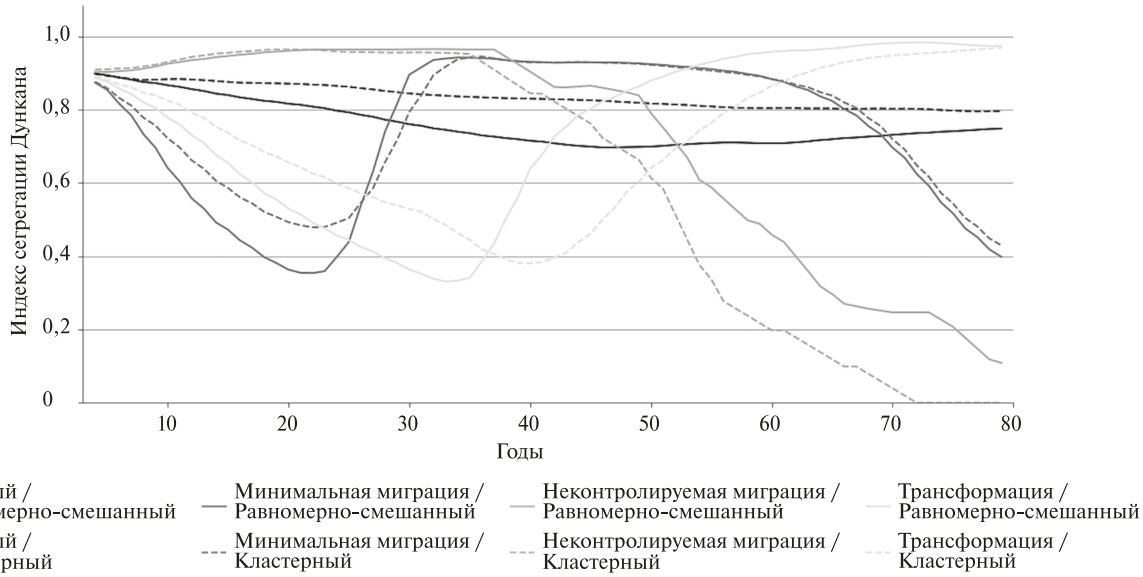


Рис. 10. Индекс сегрегации Дункана

пособий мигрантам (для сценария неограниченной и неконтролируемой миграции) и расходами на образовательно-интеграционные программы (для сценария трансформации поведения агентов). При этом для сценариев с высокой интенсивностью миграции при равномерно-смешанном способе создания рабочих мест наблюдаются более высокие расходы. Эта особенность сглаживается ближе к концу рассматриваемого периода.

На рис. 10 представлена динамика индекса сегрегации Дункана. В различных сценариях, за исключением базового, наблюдаются значительные флуктуации данной величины. В сценарии минимальной миграции, неограниченной и неконтролируемой миграции и сценарии трансформации поведения агентов в различные периоды наблюдается значительная сегрегация (формирование изолированных кластеров из различных типов агентов). При постоянном уровне толерантности агентов в каждом сценарии данная особенность связана с изменениями доли мигрантов в общем населении и перемещениями агентов в поисках соответствующих их типу рабочих мест.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ

Для более подробной оценки влияния ключевых параметров модели на представляющие практический интерес выходные переменные были проведены эксперименты вариации параметров (Lorscheid, Heine, Meyer, 2012). Оценивалось влияние государственных расходов в образование, уровней толерантности и образования агентов на темпы роста ВВП в течение всего периода симуляции и индекс сегрегации Дункана в последний момент модельного времени (табл. 2). Для краткости рассматривался только равномерно-смешанный метод создания рабочих мест.

Для каждого сценария было проведено сравнение темпов роста ВВП в каждый момент модельного времени и оценена общая доля моментов времени, в которые наблюдаемый индикатор больше для значения управляющего параметра, расположенного на оси y, чем для расположенного на оси x (рис. 11–13).

Таблица 2. Описание экспериментов по анализу чувствительности параметров модели

Сценарий	Входной параметр	Выходная переменная
Доля новых агентов-мигрантов	Доля государственных расходов на образование	Темпы роста ВВП
	Уровень толерантности по отношению к соседям	Индекс сегрегации Дункана
	Влияние уровня образования на размерность области поиска рабочего места	

Для сценария минимальной миграции (1%) можно выделить два оптимальных уровня затрат на образование — около 15 и 30% ВВП на душу населения. Аналогичная ситуация наблюдается и для сценария максимальной миграции (25%), при этом нижний оптимум находится на уровне 10%. Для базового сценария (8%) наблюдается практически монотонная зависимость роста темпов ВВП от затрат на образование — вплоть до уровня в 35%. В сценарии трансформации моделей поведения агентов (15%) четкой зависимости не наблюдается.

Для уровня толерантности агентов к соседям не наблюдается однозначной зависимости — при разных сценариях миграции наибольшие темпы роста ВВП наблюдаются при различных уровнях толерантности — от 0,1 до 0,3; при этом зачастую оптимальных уровней толерантности может быть несколько. Данный результат перекликается с классической моделью Шеллинга (Schelling, 1971), в которой также наблюдаются нелинейные эффекты относительно уровня толерантности агентов.

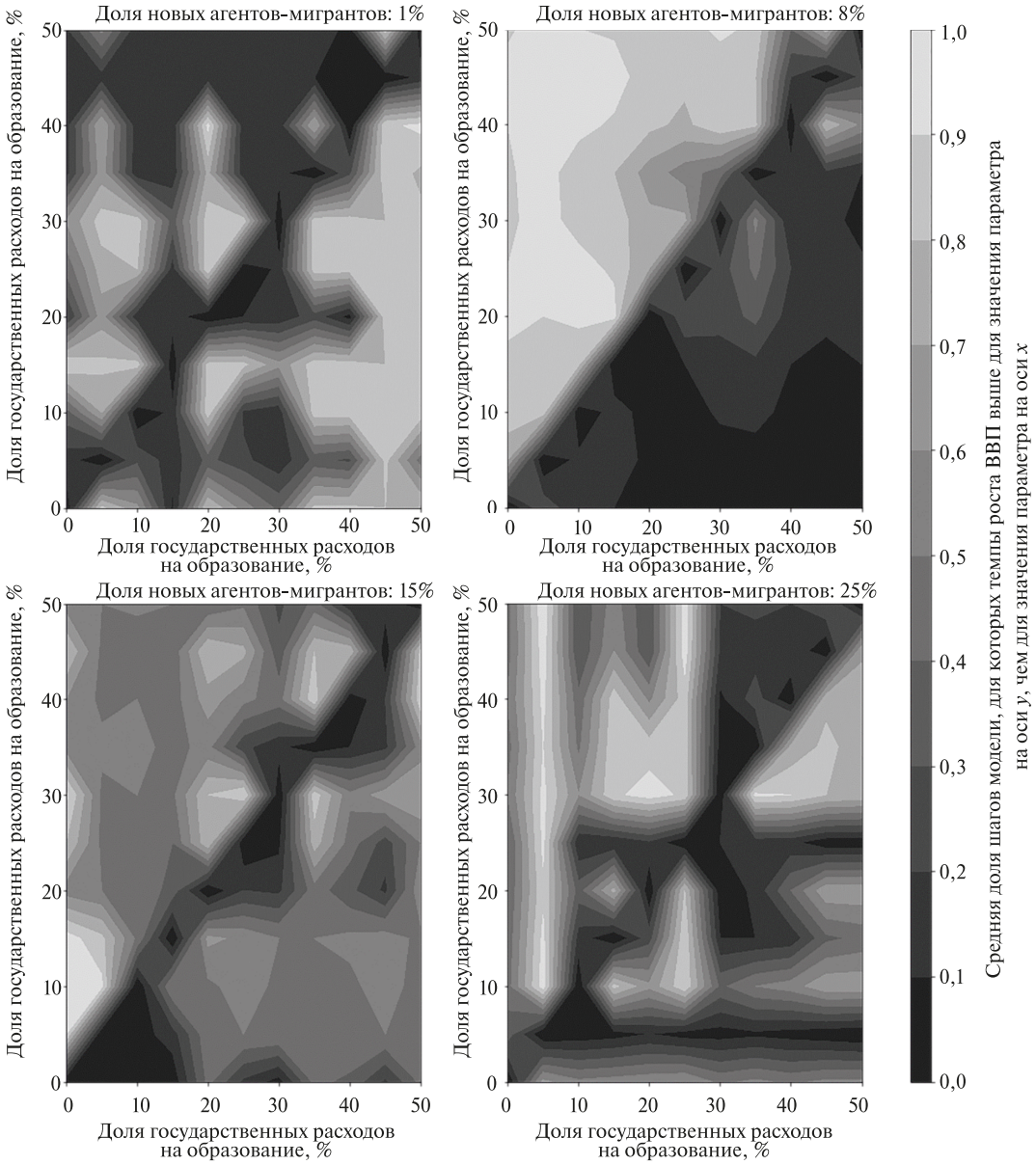


Рис. 11. Зависимость темпов роста ВВП от доли государственных расходов на образование при различных сценариях миграции

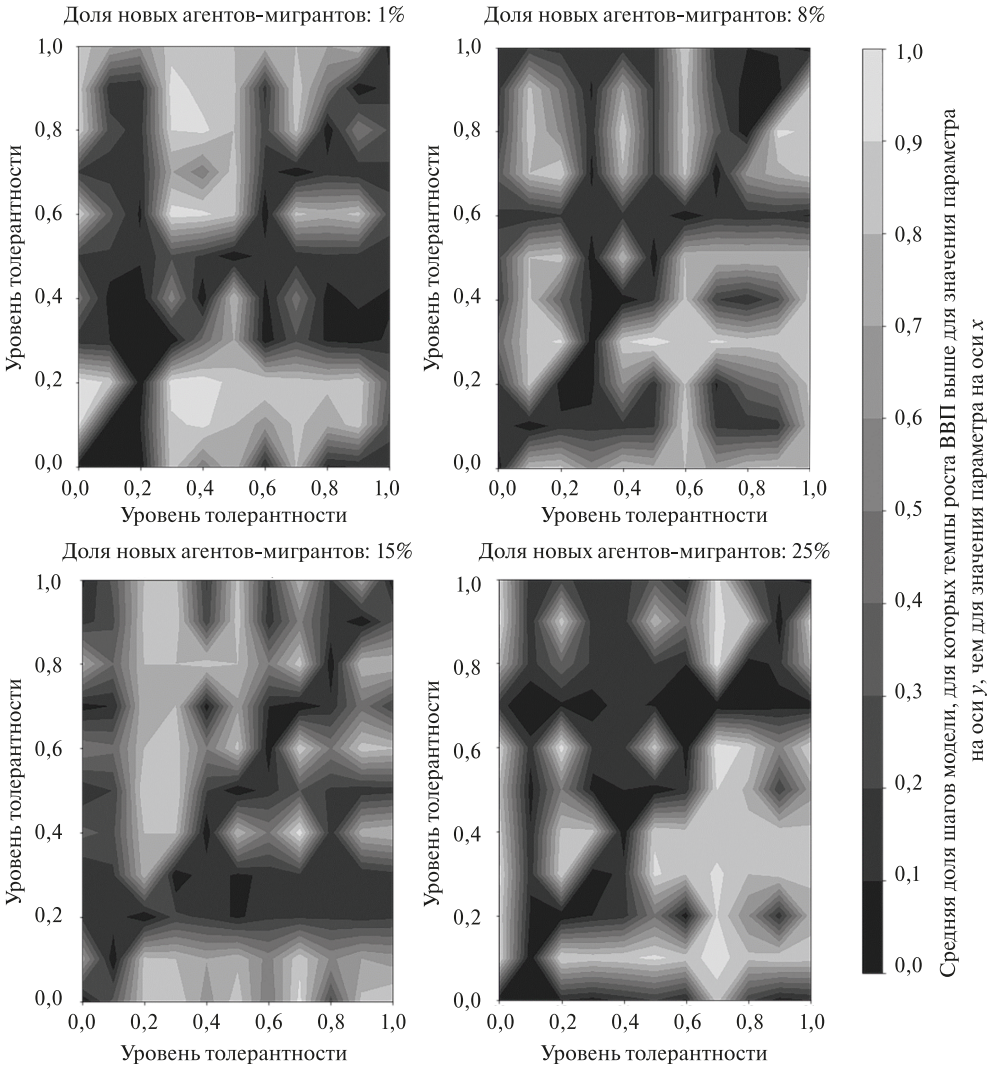


Рис. 12. Зависимость темпов роста ВВП от уровня толерантности агентов к соседям при различных сценариях миграции

Для влияния уровня образования на размерность области поиска рабочего места также не наблюдается однозначной зависимости — при различных миграционных сценариях наибольшие темпы роста ВВП наблюдаются при значениях данного параметра — от 0 до 0,4; при этом зачастую «оптимальных» уровней толерантности оказывается несколько, как и в случае уровня толерантности. Этот феномен может быть связан с усилением конкуренции за доступные рабочие места при большем радиусе «зрения» агентов — не все агенты способны найти подходящее рабочее место на каждом шаге симуляции.

На рис. 14 представлены значения индекса сегрегации Дункана на последнем шаге симуляции для различных значений параметров и различных сценариев миграции.

Отметим более сильное влияние миграционных сценариев на сегрегацию, чем рассматриваемых параметров. Наиболее сильная сегрегация наблюдается при уровне миграции в 15%, наиболее слабая сегрегация — при минимальной миграции. В пределах каждого сценария каждый параметр в отдельности влияет на сегрегацию весьма слабо.

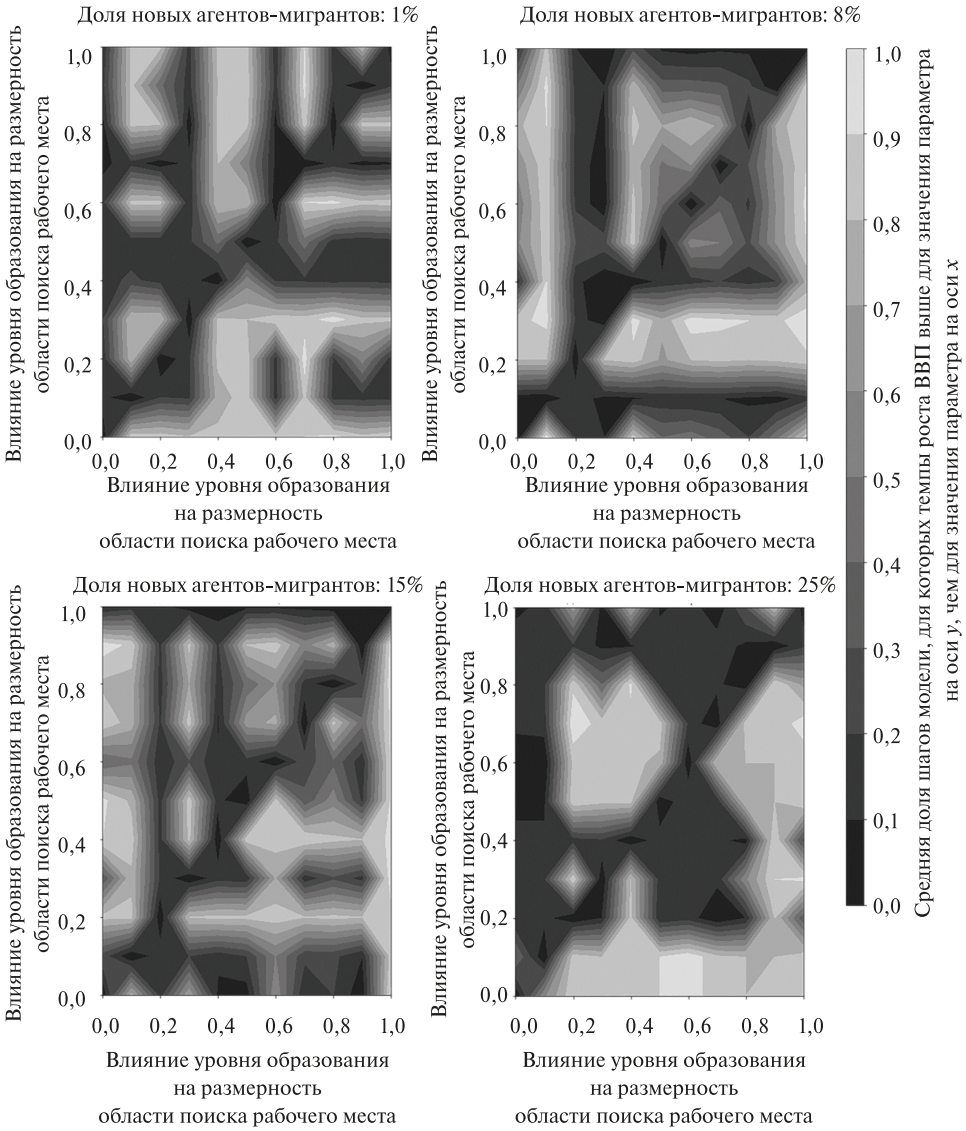


Рис. 13. Зависимость темпов роста ВВП от влияния уровня образования на размерность области поиска рабочего места при различных сценариях миграции

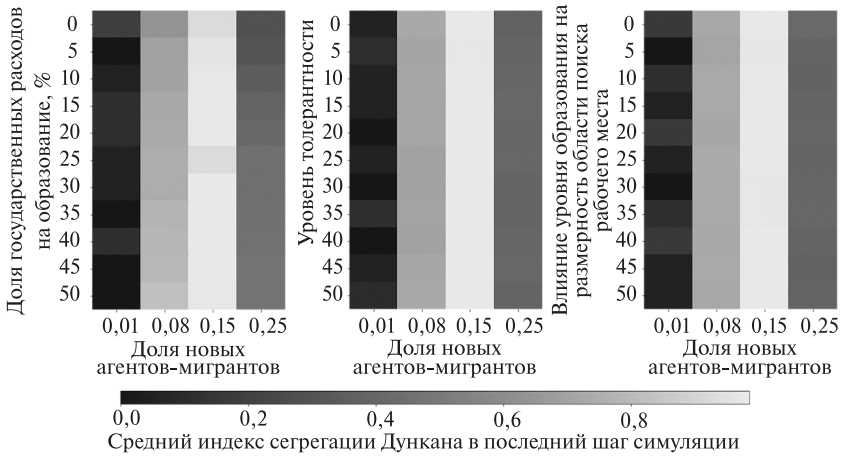


Рис. 14. Зависимость индекса сегрегации Дункана на последнем шаге симуляции от доли государственных расходов на образование, уровня толерантности агентов к соседям и влияния уровня образования на размерность области поиска рабочего места при различных сценариях миграции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье была предложен подход к исследованию социально-экономических последствий миграции с учетом государственного регулирования рынка занятости. Разработана расширенная агент-ориентированная имитационная модель взаимодействия коренных жителей и мигрантов, с помощью которой исследованы сегрегационные эффекты и динамика ключевых показателей социально-экономической системы. Модель представляет собой искусственную социально-экономическую систему, состоящую из коренного населения и мигрантов, взаимодействующих друг с другом. При этом индивидуальная система принятия решений каждого агента основана на механизме поиска ближайшего рабочего места с учетом уровня толерантности к соседним агентам, принадлежащим к другому типу, и уровня собственного образования как фактора, влияющего на размерность области поиска рабочего места либо поиска партнера для брака и рождения детей, если уровень личного комфорта превышает некоторый пороговый уровень (см. рис. 1).

Важной особенностью предлагаемого подхода является моделирование взаимодействий между агентами в дискретном пространстве, в рамках которого государство создает два типа трудовых ресурсов: высоко- и низкотехнологичные рабочие места, которые являются аттракторами для коренных жителей и мигрантов соответственно. Другой важной особенностью модели является влияние контактов между агентами-мигрантами и коренными жителями, количество которых влияет на уровень владения местным языком, время ассимиляции агентов-мигрантов. Наконец, третьим преимуществом модели является возможность моделирования влияния эффектов сегрегации, вызванных созданием и распределением рабочих мест на основе кластеров.

Разработанная модель позволила изучить восемь сценариев развития социально-экономической системы, различающихся темпами притока новых мигрантов, различным уровнем государственных расходов на образование и интеграцию, паттернами поведения агентов и др. (см. рис. 5–10). В результате наиболее предпочтительным представляется последний сценарий (сценарий 4.2) трансформации моделей поведения агентов, который обеспечивает наилучшую динамику модели, например численности коренного населения, доли новых мигрантов, темпов роста ВВП и др.

Дальнейшие исследования будут направлены на создание крупномасштабной агент-ориентированной модели социально-экономических последствий миграции с использованием суперкомпьютерных технологий, в частности, реализуемых на платформе имитационного моделирования *Flame GPU2.0* (Richmond, Walker, Coakley et al., 2010), и проведение вариационных экспериментов с использованием методов класса Монте-Карло для более подробного изучения влияния различных параметров модели на ключевые выходные переменные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Акопов А.С. (2014). Имитационное моделирование: учебник и практикум. М.: ЮРАЙТ. 389 с. [**Akopov A.S.** (2014). *Simulation modeling. Textbook and workshop*. Moscow: YURAJT (in Russian).]

Белоусов Ф.А. (2017). Модель сообществ с двумя способами воспроизводства продукта (модель «кочевников» и «землепашцев») // *Экономика и математические методы*. Т. 53. № 3. С. 93–109. [**Belousov F.A.** (2017). Model of civilization with two types of reproduction of product (model of nomads and plowmen). *Economics and Mathematical Methods*, 53 (3), 93–109 (in Russian).]

Бреер В.В. (2016). Модели толерантного порогового поведения (от Т. Шеллинга — к М. Грановеттеру) // *Проблемы управления*. № 1. С. 11–20. [**Breer V.V.** (2016). Models of tolerant threshold behaviour (from T. Schelling to M. Granovetter). *Control Sciences*, 1, 11–20 (in Russian).]

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В. (2020). Агентное моделирование популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей // *Экономика и математические методы*. 2020. Т. 56. № 2. С. 5–19. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Akopov A.S., Beklaryan G.L., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V.** (2020). Agent-based modelling of population dynamics of two interacting social communities: migrants and natives. *Economics and Mathematical Methods,* 56 (2), 5–19 (in Russian).]

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В. (2019). Укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского союза // *Экономика и математические методы*. Т. 55. № 1. С. 3–15. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Akopov A.S., Beklaryan G.L., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V.** (2019). Aggregated agent-based simulation model of migration flows of the European Union countries. *Economics and Mathematical Methods*, 55 (1), 3–15 (in Russian).]

Bacolod M., Rangel M.A. (2017). Economic assimilation and skill acquisition: Evidence from the occupational sorting of childhood immigrants. *Demography,* 54, 571–602.

Beklaryan A.L., Akopov A.S. (2016). Simulation of agent-rescuer behavior in emergency based on modified fuzzy clustering. In: *AAMAS'16: Proceedings of the 2016 International conference on autonomous agents & multiagent systems.* Richland: International foundation for autonomous agents and multiagent systems, 1275–1276.

Bezdek C.J. (1974). Cluster validity with fuzzy sets. *Journal of Cybernetics*, 3 (3), 58–73.

Bezdek C.J. (1981). *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Norwell (Mass.): Kluwer Academic Publishers.

Bleakley H., Chin A. (2010). Age at Arrival, English Proficiency, and Social Assimilation Among US Immigrants. *American Economic Journal: Applied Economics*, 2(1), 165–192.

Borshchev A. (2013). *The big book of simulation modeling: Multimethod modeling with AnyLogic 6*. Lisle (IL): AnyLogic North America.

Bove V., Elia L. (2017). Migration, diversity, and economic growth. *World Development*, 89, 227–239.

Dekking M. (2005). *A modern introduction to probability and statistics: Understanding why and how*. London: Springer.

Dudley D.O., Lieberson S. (1959). Ethnic segregation and assimilation. *American Journal of Sociology*, 64 (4), 366–374.

Duncan O.D., Duncan B. (1955). Methodological analysis of segregation indexes. *American Sociological Review*, 20 (2), 210–217.

Gorodzeisky A., Semyonov M. (2019). Unwelcome immigrants: Sources of opposition to different immigrant groups among Europeans. *Frontiers in Sociology*, 4, 24, 1–10.

Granovetter M. (1978). Threshold models of collective behavior. *The American Journal of Sociology*, 83 (6), 1420–1443.

Jean S., Causa O., Jimenez M., Wanner I. (2010). Migration and labour market outcomes in OECD countries. *OECD Journal: Economic Studies*, 2010, 1–34.

Kain J.F. (1969). Coping with ghetto unemployment. *Journal of the American Institute of Planners*, 35 (2), 80–83.

Lavrinovicha I., Lavrinenko O., Teivans-Treinovskis J. (2015). Influence of education on unemployment rate and incomes of residents. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 174, 3824–3831.

Lorscheid I., Heine B.O., Meyer M. (2012). Opening the 'black box' of simulations: Increased transparency and effective communication through the systematic design of experiments. *Comput. Math. Organ. Theory*, 18, 22–62.

Pew Research Center (2020). *A majority of Americans say immigrants mostly fill jobs U.S. citizens do not want*. Washington, Pew Research Center, June 10.

Richmond P., Walker D., Coakley S., Romano D. (2010). High performance cellular level agent-based simulation with FLAME for the GPU. *Briefings in Bioinformatics*, 11 (3), 334–347.

Sabot R.H. (1982). *Migration and the labor market in developing countries*. New York: Taylor and Francis.

Schelling T.C. (1971). Dynamic models of segregation. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1 (2), 143–186.

Urselmans L., Phelps S. (2018). A Schelling model with adaptive tolerance. *PLoS ONE*, 13 (3), e0193950.

Agent-based modelling of social and economic impacts of migration under the government regulated employment

© 2022 V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, A.S. Akopov, G.L. Beklaryan, E.A. Rovenskaya, N.V. Strelkovskii

V.L. Makarov,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru

A.R. Bakhtizin,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

G.L. Beklaryan,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: glbeklaryan@gmail.com

A.S. Akopov,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: akopovas@umail.ru

E.A. Rovenskaya,
International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; e-mail: rovenska@iiasa.ac.at

N.V. Strelkovskii,
International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria; e-mail: strelkon@iiasa.ac.at

Received 16.11.2021

This study was partially funded by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-1-14010 АНФ_а).

Abstract. This article presents an approach to modelling the socio-economic impacts of migration using an agent-based model (ABM) of interactions between migrants and natives. The model also accounts for a regulatory function of government which is the centralized creation of new workplaces that differ in the level of 'technological return' (i.e. the labour productivity that depends on the sectoral belonging of the formed workplaces). The proposed approach is based on the previously developed model of interactions between migrants and native individuals. It is focused on studying the socio-economic impacts of migration in the system with a more complex regulatory function of the government, which creates low-technological and high-technological workplaces that are attractive for migrants and natives, respectively. The agent-government has two possible strategies of workplace creation: cluster-based workplace creation in areas with high concentration of migrants and natives and creation of uniform workplaces aimed at increasing multi-particle interactions between agents of different types, and reducing the level of population segregation. This study also investigates the processes of assimilation, which are subject to the level of segregation of the studied communities, public investment in education and integration, etc. The proposed model also considers the influence of various control parameters, in particular, the influence of the agents' tolerance level on their location choice in a boundary neighbourhood, the influence of the agents' education level on the job search area dimension, and other important characteristics reflecting the behavioural features of members of the studied communities. Socio-economic impacts of migration are studied under various scenario conditions, which include different patterns of agents' behaviour belonging to the considered communities, the rate of new migrants' inflow, the amount of government education expenditures, etc.

Keywords: agent-based migration modelling, government regulation of employment, socio-economic impacts of migration, AnyLogic.

JEL Classification: C02, C63, F22, J11, J61.

Quoting: **Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Akopov A.S., Beklaryan G.L., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V.** (2022). Agent-based modelling of social and economic impacts of migration under the government regulated employment. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 113–130. DOI: 10.31857/S042473880018960-5

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 131–139

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Адаптация стохастической модели экономических циклов к эмпирическим данным

© 2022 г. В.А. Кармалита

В.А. Кармалита,
Частный консультант, Канада; e-mail: karmalita@videotron.ca

Поступила в редакцию 22.08.2021

Аннотация. Исследование посвящено разработке процедуры адаптации стохастической модели экономического цикла к эмприческим значениям валового продукта. Установление статистической эквивалентности процесса авторегрессии второго порядка АР(2) дискретной выборке из случайных колебаний функции доходов позволило определить аналитическую связь коэффициентов авторегрессионной модели с параметрами экономического цикла. Наличие этой связи сводит процедуру адаптации модели цикла к линейной задаче оценки коэффициентов АР(2)-модели по эмпирическим данным. Установлено существование оптимальной дискретизации функции доходов в виде четырех отсчетов на период цикла, при которой достигается наибольшая точность оценок коэффициентов цикла ряда Юла, т.е. обеспечивается получение эффективных оценок параметров цикла. Предложенная процедура адаптации модели цикла учитывает особенности эмпирических данных и позволяет: 1) восстановить функцию доходов из значений валового продукта; 2) выделить данные интересующего цикла; 3) определить временной интервал псевдостационарности модели; 4) оценить ее параметры, соответствующие этому интервалу; 5) проанализировать точность получаемых оценок параметров цикла. Процедура адаптации модели формально (математически) описана от эмпирических значений валового продукта до оценок параметров цикла и применима для эконометрических задач оценивания параметров систем, описываемых обыкновенными дифференциальными и разностными уравнениями второго порядка.

Ключевые слова: экономические циклы, случайные колебания, ряд Юла, оценки максимального правдоподобия, псевдостационарность.

Классификация JEL: C22, C65, C83.

Цитирование: **Кармалита В.А.** (2022). Адаптация стохастической модели экономических циклов к эмпирическим данным // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 131–139. DOI: 10.31857/S042473880018968-3

ВВЕДЕНИЕ

В результате рассмотрения в (Кармалита, 2021) одномерной экономической модели «инвестиции → доход» было предложено математическое описание экономического цикла в виде обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\ddot{\Xi}(t)+2h\dot{\Xi}(t)+(2\pi f_0)^2\Xi(t)=E(t), \tag{1}$$

где $\Xi(t)$ и $E(t)$ — флуктуации функции доходов $X(t)$ и инвестиций соответственно. Это уравнение описывает *случайные колебания* линейной упругой системы (Болотин, 1979) с собственной частотой $f_0 = 1/T_0$ и коэффициентом демпфирования (затухания) h *под воздействием белого шума* $E(t)$. Корреляционная функция $\rho(\tau)$ решения уравнения (1) имеет вид (Jenkins, Watts, 1968):

$$\rho(\tau)=\left(e^{-h|\tau|}\sin(2\pi f_h|\tau|+\varphi)\right)/\sin\varphi,$$

где $f_h=\sqrt{f_0^2-(h/2\pi)^2}$ — собственная частота с поправкой на демпфирование, $\sin\varphi = f_h/f_0$.

В соответствии с данной моделью интенсивность (амплитуда) цикла определяется диапазоном частот в окрестностях собственной частоты системы f_0, что объясняет другое название *случайных колебаний* — узкополосный случайный процесс (рис. 1).

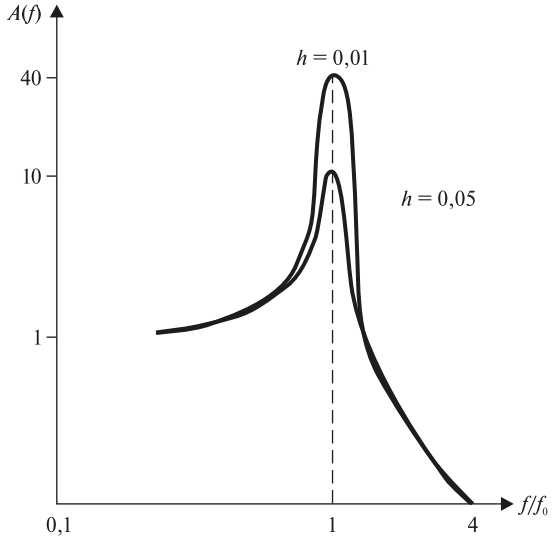


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) упругой системы

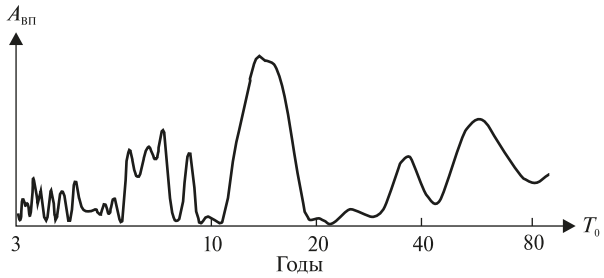


Рис. 2. Амплитудный спектр флуктуаций значений глобального ВП

Этот факт позволяет управлять значениями цикла, изменяя процентную ставку инвестиций с длительностями, коррелированными с T_0. Поскольку положение и ширина соответствующего частотного диапазона определяется параметрами h и f_0, применение модели (1) на практике требует ее адаптации к эмпирическим данным (значениям функции доходов).

Реализуется процедура адаптации с применением математических методов и эмпирических данных, являющихся результатами наблюдений (измерений) функции $X(t)$. Отсутствие средств и методов формирования непрерывных реализаций доходной функции приводит к тому, что ее значения доступны лишь в дискретные моменты времени $t_i = \Delta t\, i,\ i = 1, \ldots, n$. Иначе говоря, они имеют вид временных рядов (Box et al., 2015), представляемых последовательностями чисел $x_i = X(t_i)$. Этот факт позволяет применять дискретные экономические модели (Gandolfo, 2010) с конечными разностями вида $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$.

Разностные уравнения являются аппроксимацией дифференциальных уравнений с заменой производных соответствующими конечными разностями, поэтому их применение сопровождается методической погрешностью. Из определения производной переменной величины в виде $\dot{X}(t_i) = \lim\limits_{\Delta t \to 0}(\Delta x_i / \Delta t)$ следует, что конечность интервала дискретизации Δt означает, что $\Delta x_i / \Delta t \approx \dot{X}(t_i)$. Иначе говоря, вследствие дискретного представления экономических данных погрешность аппроксимации дифференциальных уравнений не может быть устранена в принципе.

Между тем, существует возможность применения временного ряда, модель которого дискретно совпадает (без ошибки аппроксимации) с уравнением (1) (Кармалита, 2018). Преимущество использования моделей временных рядов связано с наличием формальной процедуры оценки их коэффициентов, которая имеет математическое описание от значений эмпирических данных до оценок коэффициентов дифференциального уравнения. Целью данной работы является разработка процедуры адаптации модели экономического цикла к дискретным значениям доходной функции (разд. 1).

В разд. 2 рассмотрены особенности экономических систем и эмпирических данных, которые следует учесть в процедуре адаптации модели цикла. В частности, на практике индикатором доходов служит валовой продукт (ВП), обозначаемый далее как $G(t)$. Его значения представляют собой монетарную оценку произведенных товаров и оказанных услуг (значений функции доходов) в течение некоторого периода времени ΔT. Поскольку оценивание параметров цикла требует знания функции $X(t)$, то значения $G(t)$ нельзя непосредственно применить для адаптации модели «инвестиции→доход». Отсюда возникает задача восстановления функции $X(t)$ из эмпирических значений $G(t)$.

Спектральный анализ флуктуаций значений глобального ВП (Korotaev, Tsirel, 2010) показывает их многокомпонентность (рис. 2). Здесь T_0 обозначает период (продолжительность) экономических циклов, составляющих флуктуации доходной функции. Из представленного спектра следует, что в $G(t)$ одновременно присутствуют несколько циклов, имеющих разный период T_0. Адаптация модели

конкретного цикла требует знания эмпирических данных, относящихся только к нему. Поэтому следует разработать способ выделения данных рассматриваемого цикла из восстановленной реализации $X(t)$.

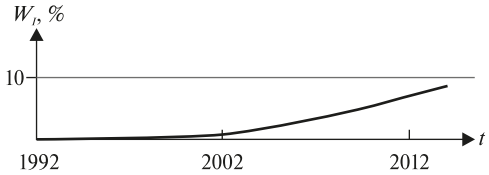


Рис. 3. Рост W_I (на душу населения), %

Как известно, прогресс производственных технологий и методов управления сопровождается повышением эффективности экономических систем. Соответственно, происходит эволюционный рост числового показателя эффективности экономических систем — среднеквадратического коэффициента усиления K_σ (Кармалита, 2021). Прогресс сопровождается и ростом совокупного богатства систем W_I, что наглядно иллюстрирует рис. 3 (Yamaguchi, Islam, Managi, 2019).

В данном примере W_I включает производственный, человеческий и природный капиталы общества. Увеличение совокупного богатства экономических систем приводит к уменьшению их собственной частоты f_0, поскольку

$$f_0 = \sqrt{w_s / W_I} \,/\, 2\pi,$$

w_s — характеристика эластичности (жесткости) экономической системы (Кармалита, 2021). Изменение параметров экономической системы во времени означает ее нестационарность, т.е. для вероятностного описания функции доходов необходимо иметь множество ее наблюдений (реализаций). Экономические данные, являясь по сути «летописью» (хроникой), доступны лишь в единственном виде. Этот факт порождает задачу оценки параметров нестационарной модели цикла по одной его реализации.

1. ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

Рассмотрим свойства временного ряда, генерируемого АР(2)-моделью в виде:

$$\xi_i - a_1\xi_{i-1} - a_2\xi_{i-2} = \varepsilon_i,$$

именуемого рядом Юла. При значениях коэффициентов модели $0 \le a_1 \le 2$ и $-1 < a_2 \le 0$ этот ряд является стационарным процессом с псевдопериодическим поведением (Box et al., 2015), корреляционная функция которого имеет вид $\rho_i = (-a_2)^{i/2} \sin(2\pi\theta i + \varphi) / \sin\varphi$. Здесь θ — циклическая частота для $\Delta t = 1$. Псевдопериодическое поведение АР(2)-процесса допускает предположение о том, что его модель может быть дискретным аналогом линейного дифференциального уравнения (1). Это допущение базируется на известном факте использования математиком Д.У. Юлом АР(2)-модели для описания движения маятника в воздушной среде с сопротивлением, пропорциональным его скорости, подвергающегося случайным толчкам через равные интервалы времени.

В (Кармалита, 2018) было предложено определить связь коэффициентов модели АР(2) с характеристиками упругой системы из условия статистической эквивалентности дискретной выборки из случайных колебаний и ряда Юла. Это условие формально записывается как равенство значений их корреляционных функций:

$$\rho(\tau = \Delta t\, i) = \rho_i. \tag{2}$$

Из (2) устанавливается однозначная связь параметров упругой системы с коэффициентами модели АР(2):

$$\begin{gathered} h = -\ln\left(-a_2\right) / 2\Delta t; \\ f_h = \cos^{-1}\left(a_1 / 2\sqrt{-a_2}\right) / 2\pi\Delta t. \end{gathered} \tag{3}$$

Поскольку интервал дискретизации случайных колебаний Δt присутствует в выражениях (3), возникает задача определения его значения. Это можно сделать исходя из особенностей процедуры оценивания коэффициентов a_1 и a_2.

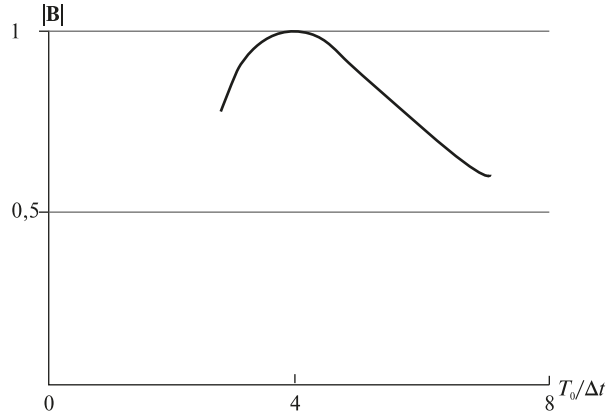


Рис. 4. Зависимость значения $|\mathbf{B}|$ от интервала дискретизации Δt

Для первых двух корреляций АР(2)-процесса можно составить систему уравнений Юла–Уокера: $\rho_1 = a_1 + a_2\rho_1$; $\rho_2 = a_1\rho_1 + a_2$. В матричной форме она записывается виде $\mathbf{B}\times\mathbf{A} = \mathbf{P}$, где

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix};\ \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{pmatrix};\ \mathbf{P} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{pmatrix}.$$

Оценивание коэффициентов a_1 и a_2 сводится к решению этого матричного уравнения относительно вектора $\mathbf{A}$, которое формально записывается в виде $\mathbf{A} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{P}$.

Для обращения матрицы $\mathbf{B}$ она должна быть хорошо обусловлена. Это значит, что для стабильного решения ее определитель $|\mathbf{B}|$ должен быть максимально большим. В этом случае малые погрешности в значениях вектора $\mathbf{P}$ не приводят к большим отклонениям в значениях коэффициентов a_1 и a_2. Поэтому критерий выбора значения интервала дискретизации Δt можно записать как $|\mathbf{B}| \underset{\Delta t}{\rightarrow} \max$.

Очевидно, что определитель $|\mathbf{B}| = 1 - \rho_1{}^2$ достигает максимума при $\rho_1 = 0$, что обеспечивается значением $\Delta t = T_0/4$ (Кармалита, 2018). Это условие не является слишком обременительным на практике, поскольку диапазону $T_0/5 \le \Delta t \le T_0/3$ соответствуют значения определителя $|\mathbf{B}| \ge 0{,}9$ (рис. 4) и его можно полагать псевдооптимальным.

При оптимальной дискретизации ($\Delta t = T_0/4 = 1$) для значений $h \le 0{,}2$ выполняется условие: $0{,}99 \le f_h / f_0 \le 1$. Поэтому для эконометрической практики полагаем равенство собственной частоты колебаний и ее значения с поправкой на демпфирование.

Использование оценок максимального правдоподобия (ОМП) корреляций временного ряда с размерностью n в виде

$$\tilde{\rho}_k = \frac{n}{n-k}\left(\sum\nolimits_{i=1}^{n-k}\xi_i\xi_{i+k}\right)/\sum\nolimits_{i=1}^{n}\xi_i^2$$

обеспечивает следующие оценки параметров авторегрессионной модели:

$$\tilde{a}_1 = \frac{\tilde{\rho}_1\left(1-\tilde{\rho}_2\right)}{1-\tilde{\rho}_1^2},\ \tilde{a}_2 = \frac{\tilde{\rho}_2 - \tilde{\rho}_1^2}{1-\tilde{\rho}_1^2}.$$

Таким образом, процедура оценивания параметров случайных колебаний трансформируется в линейную задачу оценивания коэффициентов модели АР(2). Наличие оценок $\tilde{a}_1$ и $\tilde{a}_2$ позволяет вычислить оценки как $\tilde{h}$ и $\tilde{f}_0$ на основе выражений (3), так и среднеквадратического коэффициента усиления системы в виде (Karmalita, 2020):

$$\tilde{K}_\sigma = \left[\left(1-a_2\right)/\left(1+a_2\right)(1-a_2)^2 - a_1^2\right]^{1/2}.$$

Вследствие свойства инвариантности метода максимального правдоподобия вычисленные оценки будут являться ОМП.

В силу конечности временного ряда ($n \ll \infty$) оценки коэффициентов a_1 и a_2 имеют статистическую погрешность, которая характеризуется ковариационной матрицей вида

$$\mathbf{\Gamma}_{\tilde{\mathbf{A}}} = \begin{pmatrix} D_{\tilde{a}_1} & \gamma_{\tilde{a}_1\tilde{a}_2} \\ \gamma_{\tilde{a}_2\tilde{a}_1} & D_{\tilde{a}_2} \end{pmatrix}.$$

При оптимальной дискретизации случайных колебаний оценки $\tilde{a}_1$ и $\tilde{a}_2$ независимы ($\gamma_{\tilde{a}_1\tilde{a}_2} = \gamma_{\tilde{a}_2\tilde{a}_1} = 0$), а их дисперсии равны (Кармалита, 2018):

$$D_{\tilde{a}_1} \approx \frac{1+a_2}{(1-a_2)n},\ D_{\tilde{a}_2} \approx \frac{1-a_2^2}{n}.$$

Эти выражения позволяют определять статистические погрешности оценок $\tilde{a}_1$ и $\tilde{a}_2$ и, соответственно, связанных с ними оценок параметров упругой системы. В частности, среднеквадратические относительные погрешности периода $\tilde{T}_0$ и коэффициента усиления $\tilde{K}_\sigma$ равны (Karmalita, 2020):

$$\delta_{\tilde{T}_0} = \frac{\sigma_{\tilde{T}_0}}{T_0} \approx 0{,}5\sqrt{\frac{1+a_2}{n(1-a_2)(-a_2)}},\ \delta_{\tilde{K}_\sigma} = \frac{\sigma_{\tilde{K}_\sigma}}{K_\sigma} \approx \frac{K_\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Представленная процедура позволяет адаптировать модель цикла к эмпирическим данным, для чего необходимо наличие последних в виде временного ряда $\xi_i = \Xi(t_i)$. Особенности его формирования в практике эконометрических исследований рассматриваются в следующем разделе.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ

Как указывалось во введении, в качестве индикатора доходов используется ВП, значение которого, в соответствии с его определением, математически определяется формулой:

$$G(t) = \int_{t-\Delta T}^{t} X(t)\,dt = \int_0^t H(\tau)X(t-\tau)\,d\tau, \tag{4}$$

где

$$H(\tau) = \begin{cases} 1, & 0 \le \tau \le \Delta T; \\ 0, & \tau < 0,\ \tau > \Delta T. \end{cases}$$

В метрологии уравнение свертки (4) представляет результаты регистрации процесса $X(t)$ средством измерения (СИ), инерционные свойства которого характеризуются импульсной функцией $H(\tau)$. Поэтому значения ВП можно интерпретировать как результат измерения функции доходов инерционным СИ, что приводит к систематическим погрешностям в значениях $G(t)$ по отношению к $X(t)$. В частотной области импульсная функция $H(\tau)$ имеет вид

$$H(f) = A_h(f)\mathrm{e}^{j\Phi_h(f)} = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)\mathrm{e}^{-j2\pi ft}\,dt = \Delta T\ sinc(\pi\Delta Tf)\mathrm{e}^{-j\pi\Delta Tf},$$

где

$$sinc(\pi\Delta Tf) = \begin{cases} 1, & f = 0; \\ \sin\pi\Delta Tf\,/\,(\pi\Delta Tf), & f \ne 0. \end{cases}$$

Вид амплитудной компоненты $A_h(f)$ представлен на рис. 5. *Напомним, что свертке двух функций во временной области соответствует умножение их образов Фурье. Следовательно, уравнение (*4) в частотной области пред*ставляется в виде произведения*:

$$G(f) = H(f)\,X(f), \tag{5}$$

где $X(f)$, $G(f)$ — *Фурье-образы* функции доходов и ВП соответственно. Из представленной на рис. 5 формы $A_h(f)$ следует, что $X(f) \ne G(f)$. Если $\Delta T > 1$, то амплитуды циклов с большим периодом увеличиваются, с малым — уменьшаются. Следовательно, значения ВП нельзя непосредственно использовать для адаптации модели в виде уравнения (1). Однако знание $H(\tau)$ и $G(t)$ дает возможность решить уравнение (4) относительно $X(t)$, определив $X(f)$ из (5) и вычислив его обратное преобразование Фурье:

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)\mathrm{e}^{j2\pi ft}\,df.$$

Деление $G(f)$ на $H(f_i = i/\Delta T) = 0$ делает задачу некорректной, но поиск ее решения (восстановление функции доходов) возможен методом регуляризации (Tikhonov, Arsenin, 1979). Основу этого метода составляет теорема Тихонова, которая допускает существование приближенного решения некорректной задачи при определенных условиях. Для известных $H(\tau)$ и $G(t)$ можно составить регуляризирующий оператор относительно приближенного решения $X_\alpha(t)$:

$$\Psi\left[X_\alpha(t)\right] = \int_{-\infty}^{\infty}\left|\int_0^t H(t-\tau)X_\alpha(\tau)\,d\tau - G(t)\right|^2 dt +$$
$$+\alpha\int_{-\infty}^{\infty}\left\{b_0[X_\alpha(t)]^2 + \sum_{l=1}^{p} b_l\left[d^l X_\alpha(t)/dt^l\right]^2\right\}dt,$$

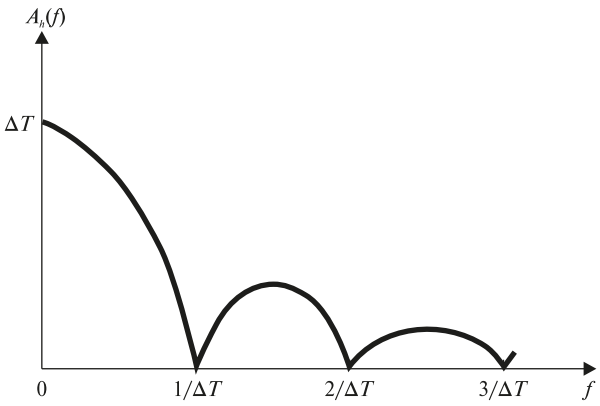


Рис. 5. Фурье-образ амлитудной компоненты импульсной функции $H(\tau)$

в котором переменная α называется параметром регуляризации. Последний член в правом выражении для Ψ характеризует гладкость функции $X(t)$ и называется стабилизатором задачи. Поиск приближенного решения $X_\alpha(t)$ формулируется как минимизация функционала Ψ: $\Psi \underset{X_\alpha(t)}{\rightarrow} \min$, которую можно выполнить в частотной области. Фурье-образ функционала Ψ имеет вид

$$\Psi\left[X_\alpha(f)\right]=\int_{-\infty}^{\infty}\left|H(f)X_\alpha(f)-G(f)\right|^2 df+\alpha\int_{-\infty}^{\infty}\left[\sum_{l=0}^{p}b_l f^{2l}\right]\left|X_\alpha(f)\right|^2 df,$$

где $X_\alpha(f)$ — Фурье-образ $X_\alpha(t)$. Решение $X_\alpha(f)$, обеспечивающее минимум функционала $\Psi[X_\alpha(f)]$, определяется экстремальным условием $\partial\Psi[X_\alpha(f)]/\partial X_\alpha(f)=0$, которое приводит $X_\alpha(f)$ к виду:

$$X_\alpha(f)=H^*(f)G(f)/\left[A_h^2(f)+\alpha B_p(f)\right]. \quad (6)$$

Здесь индекс "$*$" — знак сопряжения, $B_p(f)=\sum_{l=0}^{p}b_l f^{2l}$. Подстановка выражения (6) в функционал Ψ преобразует его в функцию параметра α:

$$\Psi(\alpha)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\alpha B_p(f)|G(f)|^2}{A_h^2(f)+\alpha B_p(f)}df.$$

Следовательно, задача минимизация функционала $\Psi[X_\alpha(f)]$ сводится к нахождению минимума функции одной переменной. Она реализуется, например, как числовой поиск (вычислительные испытания) минимума функции $\Psi(\alpha)$ (Onwubolu, Babu, 2013). Найденное оптимальное значение α_{opt} используется для вычисления в соответствии с (6) образа $X_\alpha(f)$, обратное преобразование Фурье которого дает решение $X_\alpha(t)$.

Следует отметить особенности этого преобразование. Как правило, функция доходов имеет растущий долговременный тренд, т.е. ее начальное $G(0)$ и конечное $G(t_1)$ значения различны. Преобразование Фурье функции $G(t)$ предполагает периодичность этого фрагмента, из чего следует появление разрыва между $G(t_1)$ и первым значением гипотетического продолжения функции $G(t)$. В результате решение $X_\alpha(t)$ имеет колебания (явление Гиббса) в областях, прилегающих к точкам $t = 0$ и t_1. Разрыв указанных значений *ВП* можно устранить дополнением конечной точки $G(t_1)$ кубической параболой $Q(t)$ (рис. 6).

Коэффициенты полинома $Q(t) = q_0 + q_1t + q_2t^2 + q_3t^3$ определяются из граничных условий:

$$Q(t_1) = G(t_1);\ Q(t_2) = G(0);\ dQ(t)/dt\big|_{t_1} = dG(t)/dt\big|_{t_1},\ dQ(t)/dt\big|_{t_2} = dG(t)/dt\big|_{t=0},$$

где $t_2 = 2t_1$. Поскольку производные полинома $Q(t)$ выше третьего порядка равны нулю, то в стабилизаторе задачи параметр $p = 3$. Коэффициенты b_l стабилизатора можно связать с коэффициентами полинома Баттерворта:

$$B_3(f) = b_3f^3 + b_2f^2 + b_1f + b_0 = (\lambda + f)^3 = f^3 + 2\lambda f^2 + 2\lambda f + \lambda^3.$$

Здесь λ — масштабный коэффициент, изменение значений которого приводит к изменению полосы пропускания фильтра Баттерворта, но не влияет на форму амлитудной компоненты $A_B(f)$ его частотной характеристики. Значение λ определяется корреляцией частот среза $G(f)$ и $A_B(f)$.

Наличие восстановленной доходной функции позволяет оценивать параметры модели АР(2). Однако флуктуации $X(t)$, как это иллюстрирует рис. 2, являются совокупностью разнообразных экономических циклов (Китчина, Жюглара, Кондратьева и пр.). Поэтому для адаптиции модели интересующего цикла необходимо выделить из восстановленной реализации $X_\alpha(t)$ лишь его данные. Для чего можно применить полосовой фильтр (Schlichtharle, 2011), который позволяет проходить без изменений узкополосным процессам, находящимся в его полосе пропускания частот $f_1 \le f \le f_2$, и подавляет все остальные. Поскольку основная часть энергии цикла сконцентрирована в окрестностях собственной частоты f_0, то для его выделения значения f_1 и f_2 фильтра можно определить, например, как представлено на рис. 7.

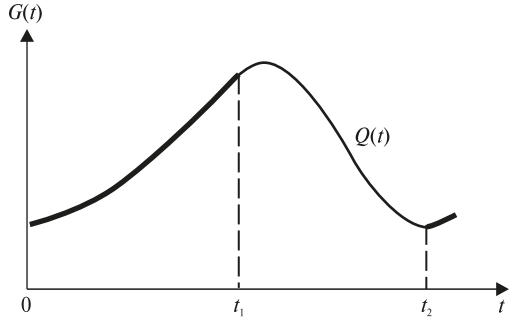


Рис. 6. Формирование периодически непрерывной функции

Для оценивания параметров модели АР(2) можно применять фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ), которые всегда стабильны. Выход такого фильтра ξ_i вычисляется как взвешенная сумма входных значений x_i: $\xi_i = \sum_{l=1}^{q} c_j x_{i-j+1}$ Важной особенностью КИХ-фильтра является тот факт, что ковариационная функция процесса АР(2) не испытывает влияния фильтрации за пределами запаздывания q. Это позволяет составить на основе указанных ковариаций систему уравнений Юла–Уокера в виде

$$\gamma_{q+3} = a_1\gamma_{q+2} + a_2\gamma_{q+1}; \quad \gamma_{q+4} = a_1\gamma_{q+3} + a_2\gamma_{q+2}. \quad (7)$$

Ее решение позволяет получить оценки коэффициентов a_1 и a_2.

Как было отмечено во введении, экономическая система в принципе является нестационарной вследствие в том числе эволюционного роста ее эффективности. Это сопровождается увеличением (уменьшением) коэффициента усиления (издержек), а соответственно, значения коэффициента демпфирования h.

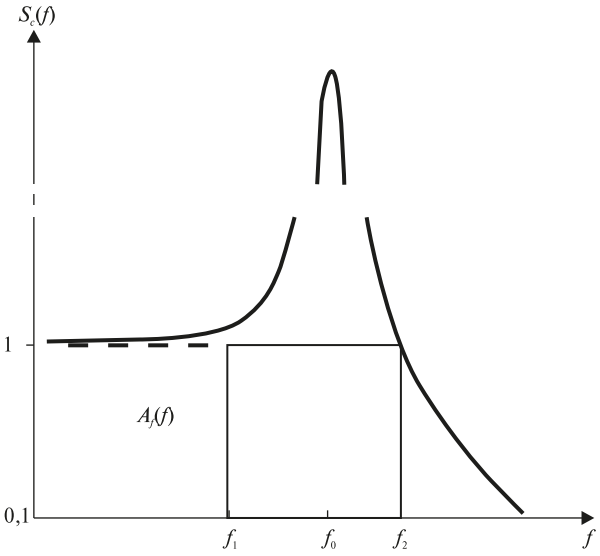


Рис. 7. Амплитудный спектр цикла $S_c(f)$ и АЧХ полосового фильтра $A_f(f)$

Если допустить монотонный характер этого изменения, можно предложить следующую процедуру адаптации нестационарной модели цикла к эмпирическим данным. В дискретной последовательности ξ_i ($i = 1,..., n$) следует выделить два последовательных фрагмента, в которых изменения значений коэффициентов a_1 и a_2 сопоставимы со статистической изменчивостью их оценок. Это позволит представить исходный ряд в виде псевдостационарных фрагментов, применяя, например, методы теории статистических выводов (Zacks, 1981). В этом случае определение размера фрагментов реализации будет осуществляться проверкой гипотезы о свойствах некоторой статистики. Уменьшение коэффициента демпфирования h приводит к увеличению значений корреляции ρ_i процесса АР(2). В качестве статистики для проверки гипотезы об изменении a_1 и a_2 можно взять, например, корреляцию ρ_1. Природу ее оценки определим, подставив $\xi_{i-1} \approx \rho_1 \cdot \xi_i$ в выражение для $\tilde{\rho}_1$:

$$\tilde{\rho}_1 = \frac{m}{m-1} \times \frac{\sum_{i=2}^{m} \xi_i \xi_{i-1}}{\sum_{i=1}^{m} \xi_i^2} \approx \frac{m}{m-1} \times \frac{\sum_{i=2}^{m} \sigma_\xi z_i \ (\rho_1 \sigma_\xi z_i)}{\sum_{i=1}^{m} D_\xi z_i^2} = \rho_1 \frac{\chi_{m-1}^2}{\chi_m^2} = \rho_1 F_{m-1,m}.$$

Здесь Z — стандартная нормальная величина, χ_{m-1}^2 и χ_m^2 — величины с χ^2-распределением, $F_{m-1,m}$ — F-статистика. Нулевая гипотеза H_0 была сформулирована как равенство значений ρ_1, вычисляемых по обоим соседним фрагментам реализации ξ_i. Если значение $\rho_{1,1}$ находится по текущему фрагменту временного ряда, а $\rho_{1,2}$ — по предшествующему, то H_0: $\rho_{1,2} = \rho_{1,1}$. Процедура теста заключается в поиске размерности m фрагментов временного ряда, при которой разницу в оценках значений $\tilde{\rho}_{1,1}$ и $\tilde{\rho}_{1,2}$ нельзя отнести к их статистической изменчивости. Поскольку цель статистического теста — проверка эволюционного роста значения корреляции ρ_1, то в качестве критического значения $\tilde{\rho}_{1,\alpha}$ следует принять нижнюю границу *доверительного интервала* ($P = \alpha$) оценки текущего фрагмента $\tilde{\rho}_{1,1}$: $\tilde{\rho}_{1,\alpha} = \tilde{\rho}_{1,1} F_{\alpha,m-1,m}$.

Гипотеза о равенстве корреляций соседних фрагментов не может быть отклонена, если вычисленное по второму фрагменту значение $\tilde{\rho}_{1,2}$ лежит в области выше критического значения, т.е. когда $\tilde{\rho}_{1,2} \geq \tilde{\rho}_{1,\alpha}$. В этом случае различие оценок обусловлено их статистической изменчивостью. При $\tilde{\rho}_{1,2} < \tilde{\rho}_{1,\alpha}$ разницу значений $\tilde{\rho}_{1,1}$ и $\tilde{\rho}_{1,2}$ нельзя отнести к статистической изменчивости из-за малой вероятности $P = \alpha$ такого события. Последовательное увеличение значения $m = (t_1 - t_0) / \Delta t$ приводит к нахождению псевдостационарного фрагмента корреляции ρ_1 (рис. 8). Для установленного значения m составляется система уравнений (7), из которой находятся оценки коэффициентов модели ряда Юла.

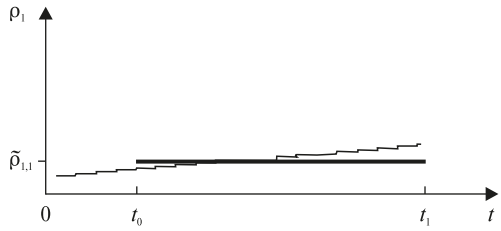


Рис. 8. Интервал псевдостационарного фрагмента цикла

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена процедура адаптации стохастической модели экономического цикла, имеющая математическое описание от исходных значений ВП до оценок параметров модели. Эта процедура сводит задачу нахождения их значений к линейной задаче оценивания коэффициентов модели процесса АР(2) с учетом следующих особенностей экономических систем и их эмпирических данных: отсутствие прямых оценок функции доходов; многокомпонентность оценок валового продукта; эволюционная нестационарность экономических систем; статистическая изменчивость оценок параметров модели.

Предложенная процедура адаптации применима для эконометрических задач оценивания параметров систем, описываемых обыкновенными дифференциальными и разностными уравнениями второго порядка. Примером, обосновывающим это утверждение, служит клиринговая модель делового цикла (Gandolfo, 2010), однородное уравнение которой имеет вид $\xi_i - b(1+k)\xi_{i-1} + bk\xi_{i-2} = 0$, где b — предельная склонность к потреблению, k — акселератор, отражающий чувствительность инвестиций к изменению дохода. Из условия равенства коэффициентов этого уравнения и АР(2)-модели можно найти связь последних с параметрами клиринговой модели цикла в виде выражений: $k = -a_2/(a_1 + a_2)$; $b = a_1 + a_2$. Наличие оценок $\tilde{a}_1$ и $\tilde{a}_2$ позволяет определить значения параметров b и k.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Кармалита В.А. (2018). Цифровая обработка случайных колебаний. Изд. 2-е. М.: Инновационное машиностроение. 88 с. [**Karmalita V.** (2019). *Digital processing of random oscillations*. Berlin, Boston: De Gruyter. 97 p.]

Кармалита В.А. (2021). Синергетический подход к макроэкономическим исследованиям // Экономика и математические методы. Т. 57. № 4. С. 17–26. [**Karmalita V.A.** (2021). Synergetic approach to macroeconomic studies. *Economics and Mathematical Methods*, 57 (4), 17–26 (in Russian)].

Болотин В.В. (1976). Случайные колебания упругих систем. М.: Наука. 336 с. [**Bolotin V.V.** (1984). *Random vibrations of elastic systems*. Heidelberg: Springer. 486 p.]

Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control*. 5th ed. Hoboken, New Jersey: Willey. 712 p.

Gandolfo G. (2010). *Economic dynamics*. 4th ed. Berlin: Springer-Verlag. 829 p.

Jenkins G.M., Watts D.G. (1968). *Spectral analysis and its applications*. London: Holden Day. 525 p.

Karmalita V. (2020). *Stochastic dynamics of economic cycles*. Berlin, Boston: De Gruyter. 106 p.

Korotaev A.V., Tsirel S.V. (2010). Spectral analysis of World GDP dynamics: Kondratieff waves, Kuznets swings, Juglar and Kitchin cycles in global economic development, and the 2008–2009 economic crisis. *Structure and Dynamics*, 4 (1), 3–57.

Onwubolu G.C., Babu B.V. (2013). New optimization technics in engineering. Berlin, Heidelberg: Springer. 712 p.

Schlichtharle D. (2011). *Digital filters: Basics and design*. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag. 527 p.

Tikhonov A.N., Arsenin V.Y. (1997). *Solution of ill-posed problems*. Washington: Winston & Sons. 258 p.

Yamaguchi R., Islam M., Managi S. (2019). Inclusive wealth in the twenty-first century: A summary and further discussions of Inclusive Wealth Report 2018. *Letters in Spatial and Resource Sciences*, 12 (2), 101–111.

Zacks S. (1981). *Parametric statistical inference: Basic theory and modern approaches*. New York: Pergamon Press. 404 p.

Adaptation of stochastic model of economic cycles to empiric data

© 2022 V.A. Karmalita

V.A. Karmalita,
Private consultant, Canada; e-mail: karmalita@videotron.ca

Received 22.08.2021

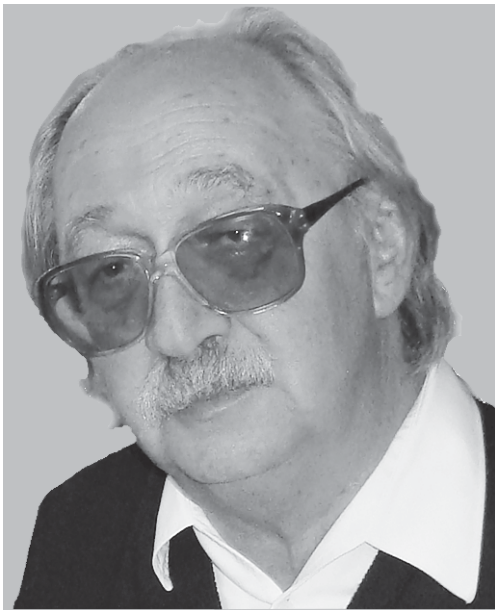
Abstract. This paper deals with adaptation of the stochastic model of the economic cycle, represented by the values of the gross product. Establishing the statistical equivalence of the Yule series to discrete samples of income oscillations made it possible to determine analytical expressions between the coefficients of the Yule model and the parameters of economic cycle. Thus, the adaptation of the cycle model to empirical data is reduced to the linear problem of estimating the Yule model factors. The peculiarity of solution to this problem ensures the presence of an optimal discretization of the income function in the form of four samples for the cycle period. It is shown that with such discretization, the highest accuracy of calculated parameter estimates is ensured, that is, the efficiency of the estimates is obtained. The proposed procedure for adapting the cycle models considers the features of the economic data and provides: 1) recovery of the income function from values of the gross product estimates; 2) extraction of values of a cycle under interest from the recovered data; 3) determination of the time interval of cycle pseudo-stationarity; 4) parameter estimation of the cycle model; 5) accuracy analysis of parameter estimates. The procedure is formally (mathematically) described from the empirical values of the gross product to getting estimates of cycle parameters. It is applicable for econometric problems of estimating the parameters of systems described by ordinary differential and difference equations of the second order.

Keywords: economic cycles, random oscillations, Yule series, maximum likelihood estimates, pseudo-stationarity.

JEL Classification: C22, C65, C83.

Quoting: **Karmalita V.A.** (2022). Adaptation of stochastic model of economic cycles to empiric data. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 131–139. DOI: 10.31857/S042473880018968-3

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 140–142



В.Г. Гребенников

15 декабря 2021 г. ушел из жизни один из старейших сотрудников ЦЭМИ РАН, член редакционной коллегии нашего журнала и наш многолетний автор — Валерий Григорьевич Гребенников.

Для нас всех это огромная потеря, поскольку Валерий Григорьевич был не только большим ученым и чрезвычайно талантливым человеком. Прежде всего он был другом и научным опекуном огромного числа людей, осиротевших с его уходом из жизни.

Большая часть биографии Валерия Григорьевича связана с ЦЭМИ. После окончания экономического факультета МГУ в 1962–1964 гг. Валерий Григорьевич работал по распределению в Горьковском политехническом институте им. А.А. Жданова в должности ассистента кафедры политэкономии. В 1964 г. поступил в аспирантуру ЦЭМИ АН СССР. После окончания учебы в аспирантуре в 1968 г. был зачислен на работу в ЦЭМИ на должность младшего научного сотрудника. Через год защитил кандидатскую диссертацию по специальности 08.00.13 на тему «Моделирование взаимосвязи темпов роста национального дохода и нормы накопления» и был переведен на должность старшего научного сотрудника.

В 1976 г. в составе группы сотрудников под руководством С.С. Шаталина перешел на работу во Всесоюзный НИИ системных исследований ГКНТ СССР и АН СССР (ВНИИСИ), где в 1977 г. стал заведующим лабораторией. В 1978 г. Валерий Григорьевич принял участие в создании Всесоюзной (ныне — Международной) научной школы-семинара «Системное моделирование социально-экономических процессов». В качестве заместителя председателя оргкомитета и эмоционального лидера компании единомышленников Валерием Григорьевичем было подготовлено и проведено 44 заседания школы.

В 1986 г. часть лабораторий отдела С.С. Шаталина перешла из ВНИИСИ в отделившийся от ЦЭМИ Институт экономики и прогнозирования научно-технического прогресса АН СССР, в том числе и лаборатория Валерия Григорьевича.

В 1992 г., приобретя опыт консалтинговой деятельности в компании «Эрнст и Янг», Гребенников вернулся в ЦЭМИ РАН и через год возглавил лабораторию. В течение ряда лет руководил отделением макроэкономики и моделирования региональных систем ЦЭМИ и был заместителем директора по научной работе.

Валерий Григорьевич был чрезвычайно разносторонним человеком, талантливым в самых различных областях — от музыки и живописи до программирования и философии.

Вклад Гребенникова в экономическую науку пока до конца не оценен. В 1970-е годы, совместно с С.С. Шаталиным и О.С. Пчелинцевым им была разработана новая концепция распределительных отношений, в основе которой лежало сочетание идеологии социально-гарантированного минимума с сильными стимулами, как тогда говорили, хозяйственного расчета. Эта концепция надолго опередила время, представ сейчас в экономической литературе в гораздо более примитивной форме «базового дохода».

В период 1968–1992 гг. исследования В.Г. Гребенникова фокусировались на теории макроэкономической производственной функции и моделировании социальных факторов экономического роста. Наиболее известные результаты по данному направлению — доказательство положительной зависимости темпов экономического роста от доли потребления в национальном доходе, а также модели взаимодействия ресурсно-технологического и институционального аспектов воспроизводства.

Значительный вклад в экономическую науку внесли и разработки В.Г. Гребенникова в области теории стоимости. Авторский подход, основанный на понимании экономических процессов как сочетания потоков, запасов и обязательств, а также использование концепции альтернативной ценности и теории замещения для объяснения закономерностей формирования стоимостных пропорций в экономике открыли новую главу в изучении данного феномена.

В девяностые и двухтысячные годы Валерий Григорьевич начал разрабатывать новое направление экономической науки — институциональную экономическую теорию, сформулировав базовые принципы институционального взгляда на экономику и предложив собственную концепцию института собственности. В последние годы оригинальность и научная глубина этих исследований проявлялись в новом для него направлении — математической теории ранжирования.

А закончить наш некролог мы хотим, предоставив слово самому Валерию Григорьевичу. Эта автобиография написана им в 2008 г.

Жизнь — это болезнь, а смерть, соответственно, исцеление.

Ашеберг[1]*, неизвестный философ неизвестного времени*

История моей болезни

Родился 8 декабря 1938 г. Хотя в известной песне поется: «Родился он в Никольском под забором, крестили его черти косогором», — в реальности произошло это в Москве, на Хорошевке. То ли роды были тяжелые или по другой причине, но с тех пор я не люблю Москву. Однако, действительно, время до половой зрелости я провел за городом, в пос. Николо-Архангельское, что перед Салтыковкой. Хорошо помню военные годы, Победу, портрет Сталина в форме генералиссимуса, который начальство доверяло мне рисовать по клеточкам. С тех пор люблю Сталина.

Рос я в бедной еврейской семье (русский отец погиб на фронте). Два раза поступал в школу. Первый раз — в 1946 г. неудачно — очень не понравилась первая учительница Клавдия Андреевна, второй раз — в 1947 г. и, воспылав недетской любовью ко второй первой учительнице Антонине Кузьминичне, прижился. Два раза поступал в МГУ. Сначала на истфак в 1956 г., и срезался на экзамене по сочинению, сделав две ошибки в слове «пропаганда», потом на экономический факультет в 1957 г., и удачно. Два раза поступал в аспирантуру. В МГУ нарвался на вопрос об особенностях бухгалтерских балансов колхозов. В ЦЭМИ ошеломил экзаменаторов беспримерно наглым собственным доказательством теоремы двойственности, к счастью, утерянным для потомства. Так что учеба давалась трудно. Но учился легко.

Закончив МГУ, угодил в ссылку в г. Горький, еще до прибытия туда академика Сахарова. В персональном деле мне было приписано изнасилование доярки во время агитпоездки по Подмосковью. Этой деталью своей биографии я неизменно горжусь. Был на целине в 1958 г. Медаль за освоение целины — единственная государственная награда, которую понесут за моим гробом.

По образованию я политэконом. Но уже в Горьком преподавать эту дисциплину мне до такой степени осточертело, что я готов был переквалифицироваться в кого угодно другого. Но тут появились первые переводные книги по математической экономике, и моя судьба была решена. Я почувствовал вкус к математике, которую в школе ненавидел. Насчет моих способностей к ней лучше промолчать.

[1] Псевдоним В.Г. Гребенникова (перевернутое слово «Гребеша»).

Но с тех пор я только прикалывался под экономиста, хотя, благодаря гуманитарной внешности, хорошо подвешенному языку и яркому перу, весьма удачно. На самом же деле меня интересуют только формулы. А еще — только исполнение берущих за душу советских песен и сочинение хулиганских стихов в стиле Баркова.

После аспирантуры остался в Центральном экономико-математическом институте, где работаю до сих пор. Но с большими перерывами. Как прирожденного сталкера, меня время от времени бросали на формирование новых институтов АН СССР и РАН — Института системных исследований, Института экономики и прогнозирования НТП. Как только жизнь в новом месте налаживалась и коллективное пьянство достигало апогея, я возвращался в ЦЭМИ, где во все времена пили еще больше.

С защитами диссертаций я не особенно торопился. Кандидатскую защитил в возрасте Иисуса Христа, докторскую в возрасте Мафусаила, за год до пенсии.

Женился тоже поздно, в 32 года. Хотя готов жениться был с ранней молодости. Сил, остававшихся от науки, пьянства и табакокурения, хватило только на одного сына — Илью. Ему я благодарен за то, что он быстро компенсировал указанную задержку во времени — я дедушка двух замечательных девочек...

* * *

Редколлегия журнала выражает глубокие соболезнования семье и близким Валерия Викторовича и сопереживает коллегам в связи с потерей товарища и коллеги.

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 143–144

Э.Ф. Баранов

Эдуард Филаретович Баранов — советский и российский экономист-математик, лауреат Государственной премии СССР.

Эдуард Филаретович родился 18 апреля 1939 г. в Москве. В 1961 г. он окончил Общеэкономический факультет Московского государственного экономического института и поступил в аспирантуру Института экономики АН СССР. С 1962 г. учебу в аспирантуре он совмещал с работой в Лаборатории экономико-математических методов АН СССР (ЛЭММ АН СССР). Его научным руководителем в аспирантуре был академик Василий Сергеевич Немчинов. В 1963 г. на базе Лаборатории экономико-математических методов АН СССР и группы научных подразделений Академии наук и Госплана СССР по инициативе академика В.С. Немчинова был создан Центральный экономико-математический институт АН СССР (ЦЭМИ АН СССР). В 1963 г. Эдуард Филаретович поступил на работу в ЦЭМИ младшим научным сотрудником, завершил работу над кандидатской диссертацией и защитил ее в 1965 г.

В ЦЭМИ Э.Ф. Баранов прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией теоретических проблем системного моделирования экономики и отделом системы моделей оптимизации народнохозяйственного планирования, которые входили в структуру программы «Система экономико-математических моделей оптимального планирования народного хозяйства», руководителем которой был Эдуард Филаретович. С 1976 по 1984 г. он занимал пост заместителя директора по научной работе института.

Во время работы в ЦЭМИ областью научных интересов Э.Ф. Баранова были межотраслевые модели народного хозяйства страны и регионов. За это время под его руководством были подготовлены методики составления межотраслевых балансов экономических районов и построения исходной информации для динамической модели межотраслевого баланса союзных республик. Эдуард Филаретович был главным конструктором известной в то время системы моделей оптимального планирования. Он — один из разработчиков методологических основ построения системы моделей оптимального перспективного планирования народного хозяйства в отраслевом и территориальном разрезе с учетом производственно-экономического и социально-экономического аспектов плана (совместно с В.И. Даниловым-Данильяном и М.Г. Завельским). Под его руководством и при непосредственным участии (совместно с И.С. Матлиным) была разработана система

согласования моделей отраслевых и территориальных решений (СМОТР), которая была экспериментально апробирована в ГВЦ Госплана СССР.

За цикл исследований по разработке методов анализа и планирования межотраслевых связей и отраслевой структуры народного хозяйства, построению плановых и отчетных межотраслевых балансов Э.Ф. Баранов в 1968 г. в составе группы ученых удостоен звания лауреата Государственной премии СССР — непосредственно за разработку и внедрение системы межотраслевых балансов.

В 1973 г. он успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Проблемы методологии использования межотраслевых моделей в прогнозировании и планировании» по специальности «Математические методы в экономических исследованиях», а в 1979 г. ему присвоено ученое звание профессора. В этот период развития экономико-математического направления в стране остро ощущалась нехватка квалифицированных кадров. Э.Ф. Баранов много времени уделял подготовке молодых специалистов высшей квалификации, особенно для союзных республик. Большую работу Эдуард Филаретович выполнял в журнале «Экономика и математические методы», будучи заместителем главного редактора с 1976 по 1985 г.

Работая под руководством В.С. Немчинова, он интересовался исследованиями экономистов и статистиков 1920–1930-х годов. В ЦЭМИ Эдуард Филаретович сотрудничал со статистиками высочайшего уровня — д.э.н Л.Е. Минцем, д.э.н. Б.Л. Исаевым, д.э.н. А.Л. Вайнштейном, членом-корреспондентом Т.В. Рябушкиным. Это сотрудничество оставило заметный след в формировании научного мировоззрения молодого ученого.

В 1985 г. Эдуард Филаретович перешел на работу в Главное управление информации при Совете министров СССР (с 1990 г. — Главный вычислительный центр Комиссии СМ СССР по чрезвычайным ситуациям), где проработал в должности начальника научно-тематического центра до 1991 г. С 1991 по 1993 г. Эдуард Филаретович работал заместителем директора Главного вычислительного центра Минэкономики (с 1992 г. — Центр экономической конъюнктуры при Минэкономики Российской Федерации), а с 1993 по 2007 г. — начальником управления, заместителем руководителя, первым заместителем директора этого учреждения. С июля 2009 г. и до последних дней Эдуард Филаретович посвятил педагогической работе в НИУ ВШЭ, которую совмещал с должностью начальника отдела анализа отраслей реального сектора и внешней торговли.

Эдуард Баранов являлся автором многочисленных научных публикаций в области построения и анализа межотраслевых балансов и анализа российской макроэкономической динамики. На протяжении многих лет он был членом научно-методологического совета Росстата.

В 2016 г. Эдуард Филаретович стал лауреатом премии Российской академии наук имени Н.Д. Кондратьева за цикл работ по теории и методологии статистического отражения и математического моделирования экономических процессов.

Эдуарда Филаретовича отличала энергия, ясный ум, глубокое понимание социально-экономических процессов, способность к аналитической работе с огромными массивами статистической информации, доброжелательность, готовность помочь, редкая порядочность. Именно таким он останется в нашей памяти.

Редколлегия журнала ЭММ выражает глубокие соболезнования родным и близким Эдуарда Филаретовича Баранова.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АКАДЕМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ГУМАНИТАРНЫХ НАУК

НА БАЗЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

с 1994 года

Преподаватели – ведущие российские ученые

- более 30% – доктора наук
- более 45% - кандидаты наук

Стажировки в:

- ведущих научно-исследовательских организациях
- органах государственной власти
- крупнейших общественных организациях
- бизнес-структурах

Интеграция науки и образования

Бюджетные места

Насыщенная студенческая жизнь

Отсрочка от армии

БАКАЛАВРИАТ

МАГИСТРАТУРА

АСПИРАНТУРА

НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ:

- История
- Философия
- Политология
- Социология
- Международные отношения
- Зарубежное регионоведение
- Востоковедение и африканистика
- Психология
- Культурология
- Археология
- Менеджмент
- Юриспруденция
- Экономика

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Горячая линия: +7 (499) 238-04-12

E-mail: info@gaugn.ru

facebook.com/gaugn

instagram.com/gaugn_/

vk.com/gaugn

gaugn.ru

Лицензия 90Л01 № 0009385 регистр. № 2323 от 9 августа 2016 г.
Свидетельство о государственной аккредитации № 3207 от 24 июля 2019 г.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

НА БАЗЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА РАН

БАКАЛАВРИАТ

Экономика

Экономическая логистика

Менеджмент организации

Менеджмент в СМИ и рекламе

МАГИСТРАТУРА

Экономика и управление наукой, технологиями и инновациями

Общий и стратегический менеджмент

АСПИРАНТУРА

Экономика

ЦЭМИ РАН — крупнейший центр отечественной и мировой экономической науки, собравший под своей эгидой целое созвездие блестящих ученых с мировыми именами. Теоретические дисциплины преподают ведущие ученые, а практические занятия — специалисты бизнес-школ и консультанты по управлению, маркетингу и финансам.

Студенты факультета с первых дней могут проходить стажировки в ведущих научных институтах, принимать участие в различных проектах, международных симпозиумах и конференциях.

Выпускники факультета получают фундаментальную экономическую подготовку, умение квалифицированно разбираться во всех разделах и современных течениях экономической и управленческой науки, что дает им дополнительные преимущества для трудоустройства в органах государственного управления, коммерческих и консалтинговых компаниях, исследовательских центрах, рекламных и информационных агентствах, а также в сфере науки и высшего образования.

5 ПРИЧИН ПОСТУПИТЬ В ГАУГН

ВЫДАЮЩИЕСЯ ПРЕПОДАВАТЕЛИ

Ученые из научно-исследовательских институтов РАН, включая академиков, членов-корреспондентов, докторов и кандидатов наук.

ВОСТРЕБОВАННОСТЬ ВЫПУСКНИКОВ

Выпускники востребованы на рынке труда. Контакты с будущими работодателями устанавливаются во время практики.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Некоторые лекции читают приглашенные специалисты из других стран. Большое внимание уделяется языковой подготовке.

УДОБСТВО

Факультеты находятся в Москве в непосредственной близости от метро. Обучение в магистратуре и аспирантуре в основном проходит в вечернее время. Подать документы можно онлайн.

СТУДЕНЧЕСКАЯ ЖИЗНЬ

Студенты ГАУГН могут участвовать в многочисленных студенческих клубах («Что? Где? Когда?», Клуб политического анализа, Китайский разговорный клуб и др.).